

Rejillas de Bragg en núcleo de fibra óptica de vidrio

H.H. Cerecedo-Núñez* y M.D. Iturbe-Castillo

Laboratorio de Fotónica y Física Óptica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Apartados postales 51 y 216, 72000 Puebla, Pue., Mexico
cerecedo@inaoep.mx

Recibido el 18 de febrero de 1997; aceptado el 19 de noviembre de 1997

En este artículo se da una revisión sobre el tema de las rejillas de Bragg impresas en núcleo de fibra óptica de vidrio. Estas rejillas actúan básicamente como espejos o filtros ópticos espectrales dentro de las fibras ópticas. El artículo tiene la finalidad de dar a conocer, de manera general, el origen de tales rejillas, los métodos de fabricación, los diferentes tipos de rejillas que existen, el modelo teórico que debe de seguirse para analizarlas y, finalmente, las aplicaciones que éstas tienen.

Descriptor: Fibras ópticas, rejilla de Bragg

This paper is a review about Bragg gratings printed into core of fiber optic. Bragg gratings can work like a mirror or as a spectral filter into fiber optic. We explain in general, how this gratings are printed, the different procedures to print it, the kind of gratings, theoretical models to analyse it, and finally we mention some application that it have.

Keywords: Fiber optics, Bragg gratings

PACS: 42.81.-i; 42.81.wg

1. Introducción

En estas tres últimas décadas el desarrollo de la óptica contemporánea ha alcanzado niveles increíbles, prueba de ello son las fibras ópticas que actualmente son una propuesta real en el mejoramiento de las telecomunicaciones; sus ventajas en funcionamiento son mayores que las que existían antes de su aparición.

Actualmente la "fotónica" es la tecnología de generar y controlar luz y otras formas de energía radiante cuya unidad cuántica es el fotón. Esta nueva área tecnológica cambia literalmente el concepto de las telecomunicaciones al introducir nuevos métodos de transmisión y modulación. Uno de los mayores retos de la fotónica es el de producir dispositivos que complementen la tecnología de las fibras ópticas. Recientemente ha surgido un nuevo dispositivo llamado rejilla de Bragg, cuyas ventajas radican en que éstas forman parte de una fibra misma. Es decir, la rejilla[†] es un elemento compacto y de bajas pérdidas en la radiación transmitida, con lo cual ha demostrado [1] ser un componente muy útil en las investigaciones y aplicaciones con fibras ópticas.

El objetivo de este artículo es entonces mostrar un panorama general de las rejillas de Bragg. Para esto en la Sec. 2 hacemos una breve revisión de los orígenes de estas rejillas, en la Sec. 3 se describen las posibles interpretaciones que se da a la formación de éstas, en la Sec. 4 se describen las técnicas que mejores resultados han dado para la impresión de rejillas de Bragg, en la Sec. 5 se muestra una breve introducción al análisis teórico que se puede seguir para analizarlas y en la Sec. 6 describimos brevemente algunas de sus aplicaciones. Finalmente, concluimos este trabajo en la

Sec. 7 resumiendo los caminos que pueden seguir para estudiar estas rejillas.

2. Ley de Bragg y rejilla de Bragg

2.1. Ley de Bragg

La estructura de los cristales puede estudiarse mediante la difracción de un haz de fotones, neutrones o electrones que incide sobre ellos. La difracción de este haz depende de la estructura del cristal y de la longitud de onda del haz incidente [2]. Los haces difractados en todas direcciones aparecen cuando la longitud de onda incidente es comparable o menor que la constante de la red de la estructura cristalina.

En 1913 W.L. Bragg dio una sencilla explicación para los haces difractados de un cristal. Él consideró los planos paralelos de la red distantes entre sí por una separación d , como se muestra en la Fig. 1, en ella se considera la radiación incidente perpendicular a los planos. La diferencia de trayectorias correspondientes a haces reflejados en planos adyacentes es $2d \sin \theta$, midiéndose θ a partir del plano, y se produce interferencia constructiva de la radiación procedente de planos sucesivos cuando la diferencia de trayectorias es un número entero N de la longitud de onda que incide, de modo que

$$2d \sin \theta = N\lambda. \quad (1)$$

Esta fórmula deducida por Bragg es simple, pero resulta convincente porque reproduce los resultados correctos. La reflexión de Bragg puede generarse únicamente para $\lambda \leq 2d$ [3].

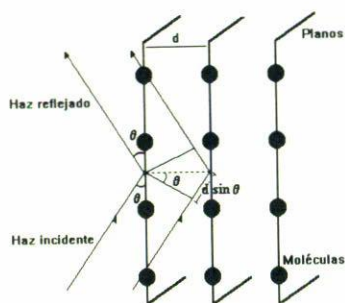


FIGURA 1. Esquema de un haz de luz reflejado por “los planos paralelos” formados dentro de un cristal.

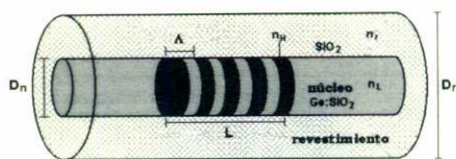


FIGURA 2. Localización de una rejilla de Bragg dentro del núcleo de una fibra óptica donde n_H alterado por la exposición a la radiación uv, n_L índice de refracción del núcleo sin modificación, D_n diámetro del núcleo, D_r diámetro del revestimiento, Λ período fundamental de la rejilla formada, L longitud de la rejilla.

La ley de Bragg es una consecuencia de la periodicidad de la red cristalina. Dentro de un cristal existen muchos planos para los cuales los haces procedentes pueden ser reflejados para interferir constructivamente, (ver Fig. 1). Dependiendo del plano escogido, algunos de ellos concentrarán más átomos que actúan como agentes reflectores que otros. En general, los haces reflejados por estos planos serán los de mayor intensidad.

La explicación dada por Bragg para deducir la “ley de Bragg” se puede aplicar de manera análoga a las interfaces de un apilamiento de películas delgadas y, por lo mismo, a la interpretación del funcionamiento de una rejilla de Bragg dentro del núcleo de una fibra óptica, ya que, físicamente, este ensamble de películas delgadas se comporta como lo hacen los planos de un cristal. En este caso las longitudes de onda que satisfacen la ecuación darán lugar a una alta reflectancia de la longitud de onda incidente debido a que los “haces” reflejados por las interfaces interfieren constructivamente en la superficie inicial.

2.2. Rejilla de Bragg

Una rejilla de Bragg es una estructura periódica de “placas” o “películas” de dos índices de refracción diferentes, una con índice de refracción alto (n_H) y otra con índice de refracción bajo (n_L), cuya diferencia es $\Delta n \approx 10^{-4}$ (ver Fig. 2). Este arreglo periódico se forma sólo en el núcleo de una fibra óptica (por lo general monomodal y activada con germanio), ya que éste es el que contiene los centros activos (GeO_2), los cuales originan la formación de tales rejillas. El nombre de rejilla de Bragg proviene entonces de la analogía que existe

entre el comportamiento de la radiación electromagnética reflejada en éstas y la radiación electromagnética que se refleja de los planos en un cristal ideal.

3. Origen de las rejillas de Bragg en fibra óptica

La fotosensibilidad en vidrios fue descubierta por K.O. Hill y colaboradores en los laboratorios de Communications Research Center (CRC), en Canadá, en 1978, mientras se estudiaban los efectos no lineales en una fibra óptica con altas concentraciones de germanio [4]. En un experimento se observó un incremento de la atenuación cuando el núcleo de una fibra óptica se exponía prolongadamente a luz de un láser de iones de argón. Una investigación posterior sobre el origen del incremento de la atenuación determinó que la intensidad de la luz reflejada por la fibra incrementó también significativamente como función del tiempo de exposición. Posteriormente se probó que este incremento en la reflectividad de la fibra era resultado de una rejilla permanente (formada por índices de refracción diferentes) que se foto-indujo en el núcleo de la fibra. Este nuevo efecto no lineal en las fibras ópticas fue llamado fotosensibilidad. A partir de este momento diversos investigadores se interesaron por este nuevo fenómeno y continuaron realizando investigaciones al respecto [5].

La fotosensibilidad en fibras ópticas tiene importancia tanto científica como práctica. El origen de este tipo de efecto no lineal en vidrio todavía no se entiende bien, por lo que esto hace que los detalles del proceso de generación de cambios en índices de refracción tampoco se entiendan completamente. En realidad se espera que más de un sólo proceso esté involucrado en la formación dinámica de las rejillas [6].

Algunos vidrios, como los usados comúnmente en los espejos, lentes, etc., se conocen desde hace cientos de años y se sabe que son transparentes a la radiación visible. Esto se debe a que no existe resonancia electrónica o molecular en este rango de frecuencias. En la resonancia molecular infrarroja la transmisión de radiación se bloquea, lo cual se manifiesta en un calentamiento gradual en la superficie. Con la radiación ultravioleta (uv), a longitudes de onda por debajo de 300 nm se va haciendo cada vez más y más energética. A esas longitudes de onda corta, la energía de los fotones es más alta y los enlaces electrónicos presentan resonancia. (En el caso del Si-O la absorción comienza justo por abajo de los 200 nm, y algunos defectos de bandas centrales ocurren entre 200–300 nm) [7].

La longitud de onda pico de absorción de los defectos de GeO está en ~ 240 nm (~ 5.5 eV). Se ha propuesto un modelo [1] para explicar los cambios en el índice de refracción relacionados con los cambios en la absorción vía el formalismo de Kramers-Kronig, y a través de los cambios en el índice de refracción calculado del cambio de la banda de absorción, donde al final resulta un orden de magnitud más pequeño que lo medido inicialmente. Esto es debido a un movimiento de defectos del GeO, con lo cual resultarán centros de Ge con la liberación de un electrón, libre de moverse dentro de la

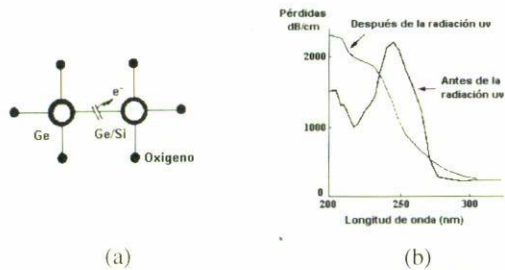


FIGURA 3. (a) Enlace del germanio con el dióxido de silicio, (b) espectro de absorción del dióxido de silicio activado con germanio antes y después de la exposición a la radiación uv [1]

matriz del vidrio hasta que es atrapado (ver Fig. 3a). Existe evidencia de que la absorción por abajo de la longitud de onda de 240 nm se altera también radicalmente con un cambio en los bordes de la banda de absorción [1]. Entonces parece que los fuertes cambios en el índice de refracción que se observan resultan de las alteraciones en los defectos de la estructura de la banda en el uv profundo (ver Fig. 3b).

El fenómeno de fotosensibilidad en fibra óptica no se restringe al germanio solamente, sino que el cerio, el europio y el germanio con erbio han mostrado cierto grado de variaciones de sensibilidad cuando se introducen dentro del sílice de una fibra óptica, pero no son tan sensibles como el germanio. También el germanio con boro tiene un gran éxito en la producción de grandes modulaciones de índice de refracción (del orden de 10^{-3}). En este sistema, es posible que se induzcan cambios de la estructura microscópica producidos por la exposición de la radiación de la luz uv, permitiendo cambios de la densidad del material [6].

Actualmente existen dos razones de interés sobre la fotosensibilidad para que las fibras de sílice no estén activadas con germanio [8]. La primera es para integrar dispositivos reflectores en fibras que no contengan germanio. Un buen ejemplo de esto es la fibra de Er:Yb, donde se ha utilizado mejor el fósforo en lugar del germanio para incrementar la transferencia de energía. La segunda razón es que una fibra típica con germanio exhibe un cambio en el índice de refracción como función de la exposición a la luz uv y esto no es deseable para imprimir rejillas de fase.

4. Grabado de las rejillas de Bragg

Las rejillas de Bragg se pueden formar por varios métodos, en los cuales se hace incidir un patrón de interferencia que proviene de una fuente intensa de luz láser ultravioleta sobre el núcleo de la fibra óptica, lo cual produce una modulación del índice de refracción o una rejilla de fase en el núcleo de la fibra óptica (ver Fig. 4). Este patrón de interferencia de luz uv, que forma la rejilla de Bragg, incide sobre un costado de la fibra óptica.

La Fig. 5 muestra el arreglo experimental típico para producir las rejillas en la fibra. En él se muestra también la evolución del espectro de transmisión en la fibra con rejilla, graficada como función la cantidad de pulsos del láser excímero.

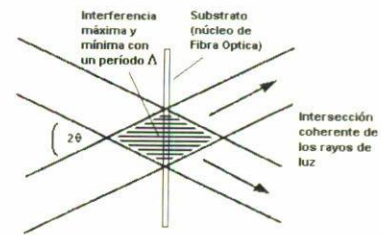


FIGURA 4. Patrón de interferencia de luz uv que forma una rejilla de Bragg [9].

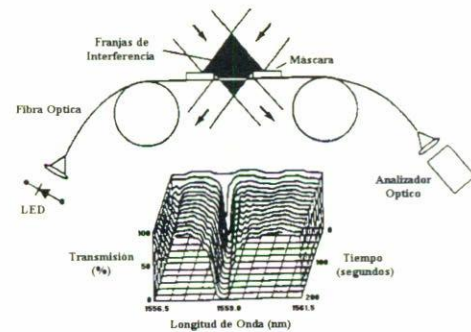


FIGURA 5. Cambios del espectro de transmisión del núcleo de una fibra óptica conforme pasa el tiempo de impresión de una rejilla de Bragg [7].

El haz láser de excímero se divide en dos y se recombina coherentemente en el núcleo de la fibra. Los nodos y los antinodos del patrón de interferencia modifican periódicamente el índice de refracción del vidrio en el núcleo de la fibra, gradualmente se va formando una rejilla de Bragg. Cada pulso sucesivo del láser (arriba de 80 Hz) contribuye un poco más a la formación de la rejilla, al mismo tiempo se incrementa el índice de refracción promedio: el resultado es la mínima transmisión con un corrimiento lento del espectro hacia longitudes de onda grandes conforme la rejilla se va formando. Esta técnica de múltiples pulsos permite un control preciso de las propiedades de la rejilla durante el período de grabado; pero tiene la desventaja de que desplazamientos (producidos por vibración mecánica o variaciones térmicas) del orden de nanómetros en el interferómetro pueden causar que el patrón de franjas se mueva, borrando la formación de la rejilla. Este problema puede evitarse si el pulso de energía se incrementa, mientras que las rejillas débiles se pueden imprimir con un sólo pulso del láser [7].

En una manera simple, la rejilla de Bragg se graba de tal forma que la luz que se propaga a través del núcleo de la fibra óptica incide sobre ella de una manera perpendicular a los diferentes planos o películas que la forman (ver Fig. 6).

La forma en que operan las rejillas de Bragg es la siguiente: parte de la luz que incide sobre ellas es transmitida y la otra parte es reflejada, la luz que se refleja proviene de una alta reflectancia debido a que las placas tienen un grueso óptico de $\lambda/4$ y por lo tanto los haces que se van reflejando en algunas superficie se encuentran en fase al salir por la primera interface [1] (ver Fig. 6).

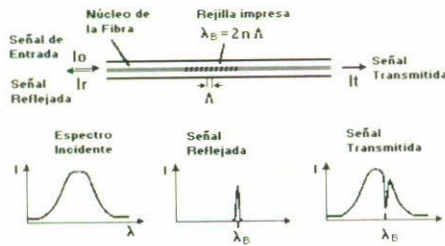


FIGURA 6. Espectros y direcciones de las radiaciones transmitida y reflejada por una rejilla de Bragg [9].

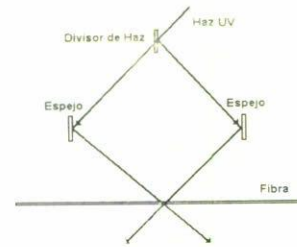


FIGURA 8. Diagrama de impresión de una rejilla de Bragg por la técnica interferométrica tradicional [1].

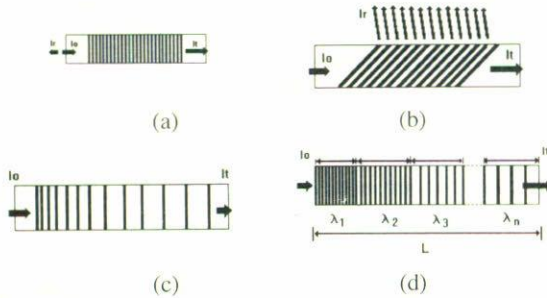


FIGURA 7. (a) Rejilla de Bragg con período uniforme, (b) rejilla con pendiente, (c) rejilla con período no uniforme, (d) rejilla con período no uniforme por pasos [6].

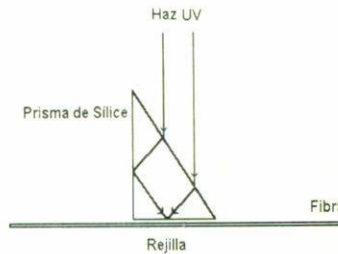


FIGURA 9. Esquema de impresión de una rejilla de Bragg con la técnica interferométrica tradicional ayudándose de un prisma de sílice [1].

Se pueden grabar diferentes tipos de rejillas de Bragg. La más conocida es la rejilla de Bragg con periodo uniforme (Fig. 7a), la cual acabamos de describir en los dos últimos párrafos. La rejilla con pendiente (Fig. 7b) que puede formarse inclinando un poco la fibra óptica, la rejilla con período no uniforme (Fig. 7c) que puede formarse doblando la fibra, en la cual el período de la rejilla se va incrementando. La rejilla con período no uniforme por pasos (Fig. 7d) que puede formarse imprimiendo en serie rejillas con diferentes períodos, en la cual el periodo no uniforme está formado por varios segmentos de rejillas uniformes. Cada una de ellas tienen diferentes aplicaciones [1], por ejemplo, la rejilla con período uniforme puede utilizarse como un espejo reflector o como filtro espectral, la rejilla con pendiente puede utilizarse para acoplar modos de una fibra a otra, las rejillas con período no uniforme puede utilizarse para comprimir pulsos o para compensar dispersión.

Las primeras rejillas con período uniforme que se imprimieron requerían procesos múltiples que involucraban muchos pasos complicados, tales como pulir en extremo la fibra, aplicar fotoresina, exponer holográficamente y remover con un haz de iones reactivos. Eso tomaba dos días y las probabilidades de éxito eran bajas. Diversos grupos en el mundo han logrado mejoras en la inscripción óptica de alta calidad dentro de núcleos de fibra óptica a través de exposición interferométrica con luz láser ultravioleta [7].

A continuación describiremos algunos de los métodos que mejor resultado han dado para la impresión de rejillas de Bragg con periodo uniforme.

4.1. Método de impresión por interferometría tradicional

La primera rejilla impresa por un costado fue hecha usando un interferómetro de división de haz (ver Fig. 8). El espaciamento entre las franjas de interferencia y, como consecuencia, el período inducido en la rejilla dentro de la fibra, está dado por la relación $\Lambda = \lambda / [2 \sin \theta]$; de donde vemos que podemos controlar la periodicidad de la rejilla simplemente cambiando el ángulo o cambiando la longitud de onda del láser dentro de los límites de la banda de absorción. En el interferómetro se introduce una lente cilíndrica para enfocar los haces que interfieren en una línea sobre la fibra. En un experimento particular [6], el flujo de radiación uv era arriba de 1 J/cm^2 por pulso, lo cual está cerca del umbral de intensidad que daña la superficie de la fibra. Para producir una buena interferencia se usó un láser con una longitud de coherencia de alrededor de 10 cm. Se debía cuidar que el interferómetro estuviera libre de vibraciones y de corrientes de aire durante el periodo de exposición que era aproximadamente de 1 a 5 minutos.

Con esta técnica es posible imprimir rejillas de Bragg con una longitud de onda de reflexión en 850 nm. Este arreglo interferométrico es excelente para tiempos cortos de exposición (por abajo de los 60 minutos), pero requiere de un diseño cuidadoso si se desea utilizar para tiempos largos de exposición. Esto es debido a que hay espejos que al vibrar pueden traslapar la rejilla que se esta imprimiendo. Sin embargo, este esquema es ideal para láseres con baja coherencia temporal debido a que la longitud de la trayectoria puede hacerse idéntica [1].

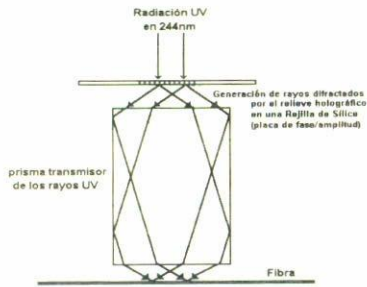


FIGURA 10. Esquema de impresión de una rejilla de Bragg utilizando una máscara de fase [1].

Una técnica alternativa al interferómetro, que acabamos de describir, es usar un prisma de sílice. El haz ultravioleta se dirige hacia la cara hipotenusa de un prisma de 90 grados, como se muestra en la Fig. 9, de tal forma que únicamente la mitad del haz que incide se dirige hacia la cara (del prisma) paralela al eje de la fibra. La otra mitad del haz se dirige hacia la cara (del prisma) perpendicular al eje de la fibra y se refleja. Así, los dos haces pueden interferir en la cara paralela a donde se coloca la fibra. Utilizando una lente cilíndrica se puede enfocar linealmente sobre la fibra. Debido que el interferograma se forma haciendo incidir dos rayos, este interferómetro requiere del uso de una fuente esencialmente coherente. Este interferómetro es intrínsecamente estable, debido a que la diferencia entre las trayectorias es generada dentro del prisma y permanece inafectada por vibraciones. Con esta técnica se han reportado tiempos de exposición hasta de 8 horas [1].

Con este interferómetro se pueden reducir significativamente tanto el tamaño como la estabilidad requeridos para imprimir rejillas, a pesar de que se sacrifica algo de flexibilidad en el tamaño y el ángulo entre los rayos para imprimir la rejilla [6].

Sin embargo, las dos técnicas descritas arriba no son las apropiadas para imprimir rejillas de Bragg en una longitud de onda precisa, debido a que es difícil ajustar el ángulo entre los rayos de interferencia [1].

4.2. Método de impresión con máscara de fase

Un desarrollo reciente para imprimir rejillas de Bragg es utilizar una rejilla de fase difractiva (ver Fig. 10). Ésta es una técnica simple que se basa en la replicación de una rejilla de relieve fabricada como una máscara de fase en sílice. El período de la rejilla es aproximadamente el mismo que se requiere para producir una rejilla de reflexión en sílice activado con germanio. Cuando se envía un haz uv hacia la máscara de fase es difractado en los órdenes -1 , 0 , y $+1$. A continuación se coloca un prisma recto rectangular, donde los órdenes -1 y $+1$ sufren reflexión interna total y posteriormente interfieren a la salida en donde se encuentra la fibra. Esta técnica de no contacto es flexible y permite hacer cambios rápidos de la longitud de onda de Bragg. Esta técnica también es altamente estable, es insensible a traslaciones de los haces y es

extremadamente compacta. Se han reportado variaciones de este esquema, en el cual la fibra se coloca directamente detrás de la máscara de fase [1].

El método de máscara de fase ha simplificado la producción de las rejillas, disminuyendo los requerimientos temporales y espaciales del láser uv [1].

Se pueden lograr rejillas de Bragg por grandes longitudes para aplicaciones en acoplamiento de modos, por ejemplo, imprimiendo punto por punto utilizando traslaciones de alta precisión [6].

Entre los láseres comúnmente usados para la impresión de rejillas está el pulsado de excímero de KrF (20 ns) en 248 nm, el láser de argón doblado a la frecuencia 244 nm o 257 nm, la frecuencia cuádruple del láser Nd:YAG o Nd:YLF, entre otros, para producir una radiación sintonizable entre 243 a 250 nm [7].

En la actualidad puede ser posible fabricar rejillas de Bragg durante los procesos de fabricación de la fibra óptica. Lo cual les daría un carácter industrial de fabricación.

5. Modelos para la propagación de un haz a través de una rejilla de Bragg

Existen muchos medios periódicos en los cuales únicamente se puede obtener una solución aproximada de las ecuaciones de Maxwell. Generalmente se usan dos aproximaciones. Rigurosamente el tratamiento teórico de estas rejillas puede hacerse (y se ha hecho) a través de dos posibles aproximaciones, una es el formalismo de ondas de Bloch, en la cual se pueden describir las propiedades ópticas del medio periódico por medio de $\varepsilon(\vec{r})$, que es el tensor de la constante dieléctrica del medio [10].

La otra aproximación es utilizar teoría de modos acoplados. En esta última teoría las variaciones del tensor dieléctrico se consideran como una perturbación que acopla los modos normales no perturbados de la estructura [10].

El estudio teórico de las rejillas de Bragg tiene su base en estos dos procedimientos. Sin embargo, el comportamiento de la luz reflejada por una rejilla de Bragg puede describirse considerando a ésta como un ensamble de películas delgadas [11] y haciendo un análisis de la luz reflejada por estas mismas. El acuerdo entre ambos modelos (los descritos anteriormente y éste) es de esperarse en fibras monomodales en las cuales el modo de propagación difractado debe ser casi idéntico al modo incidente, excepto que se propagan en direcciones opuestas.

6. Aplicaciones

Entre las aplicaciones que tienen las rejillas de Bragg podemos encontrarlas en cavidades externas (para diodos láser) e internas (para fibras láser); para compensar dispersión y compresión de pulsos; en sensores cuasi-distribuidos de temperatura, esfuerzo, y campo eléctrico; así como muchas aplicaciones más de las cuales tienen aplicación directa tanto en

la industria en general como en el área de comunicaciones a través de fibra óptica y en el estudio de algunos fenómenos de propagación en fibra óptica.

6.1. Rejillas de Bragg como filtros

Las rejillas de Bragg pueden usarse como espejos dieléctricos en fibra. Actualmente éstas tienen anchos de banda desde ~ 0.05 nm a ~ 20 nm [1]. Existen también rejillas como filtros pasa bandas, ya que es usual filtrar algunas longitudes de onda, separadas por pocos nanómetros. En principio éstos son filtros de bajo costo, sin embargo, existen algunas pérdidas para las longitudes de onda que no son filtradas [1].

Las rejillas también pueden utilizarse como filtros Fabry-Perot. Estos dispositivos de 10 cm de largo tienen un rango espectral de 1 GHz y una fineza de 67 [1]. Comparado con la fineza de 1000 que se pueden lograr usando espejos convencionales. Aun así, en principio se pueden lograr finezas del orden de 100.

6.2. Cavidades externas para diodos láser

Otra aplicación de las rejillas es utilizarlas en fibra para un láser de semiconductor (ver Fig. 11). Con ellas se han logrado frecuencias únicas de operación con anchos de línea menores a 1 GHz. De lo cual se han obtenido intensidades de salida arriba de 20 mW y se han usado para generar trenes de pulsos solitones de 44 ps con amarre de modos arriba de 2.9 GHz [1].

6.3. Láser con rejilla en fibra óptica activada con elementos de tierras raras

En esta aplicación, por ejemplo, se empalma una fibra de 30 m activada con erbio a una rejilla con una reflectancia del 0.5% [1], para la longitud de onda de 1537 nm con lo cual se genera una fibra láser (ver Fig. 12).

También existe la posibilidad de cambiar la longitud de onda de emisión láser sin la complicación de empalmar otra rejilla. Esto se puede lograr cambiando la fibra con la rejilla deseada que se encuentra acoplada (ver Fig. 13) y pueden usarse para cambiar fácilmente la longitud de operación del láser a cualquier longitud de onda del ancho de banda de ganancia, y han logrado seleccionar diferentes longitudes de onda sobre un rango de 93 nm en un sólo láser [1].

También existen los láseres de doble frecuencia. En los cuales es posible colocar dos rejillas en serie y forzar a un sólo láser operar con dos longitudes de onda simultáneamente [1].

6.4. Rejillas para compresión de pulsos y para compensar dispersión

La dispersión asociada con la transmisión puede utilizarse a través de una rejilla para compensar la dispersión con signo opuesto. Pero las altas dispersiones se restringen a anchos de banda estrechos y la banda de la rejilla para dispersar es muy

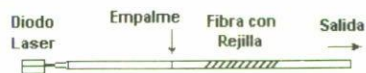


FIGURA 11. Rejilla de Bragg utilizada como cavidad externa en un diodo láser [1].



FIGURA 12. Rejilla de Bragg utilizada en una cavidad de fibra láser [1].

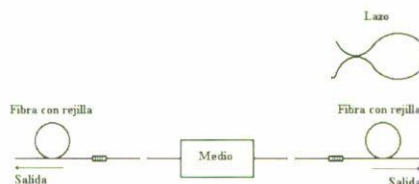


FIGURA 13. Rejillas de Bragg utilizadas para seleccionar diferentes longitudes de onda en una fibra láser [1].

corta. Aun así, se ha reportado que pulsos de 400 fs que se dispersaron (por dispersión normal) en 245 m, se recompensaron en 450 fs usando una rejilla de Bragg con periodo no uniforme, de 8 mm de largo y con un ancho de banda de 15 nm en una longitud de onda central de 1560 nm.

También se ha reportado compensación de dispersión sobre 4 Km, utilizando pulsos sobre fibra con baja dispersión [1], en la cual se ha obtenido una razón de recomposición de aproximadamente 67.

Las rejillas también pueden usarse efectivamente para compensar dispersión lineal permitiendo cero dispersión en 1300 nm para fibras a 1500 nm.

Las rejillas con "chirp" (periodo no uniforme) pueden usarse para pre-dispersar pulsos, reduciendo la intensidad pico y evitando efectos no lineales. Estas rejillas pueden usarse también para codificación de tal forma que la rejilla que dispersa apropiadamente permitirá codificar datos [1].

6.5. Sensores

Es posible imprimir o unir varias rejillas de Bragg sobre un tramo considerable de fibra óptica. Lo cual nos da la posibilidad de sensar (temperatura, esfuerzo, etc.) de una manera cuasi-distribuida, ya que cada rejilla opera en una longitud de onda de Bragg distinta. Además, estas rejillas en 1550 nm son compatibles con las redes de telecomunicaciones. Los coeficientes de temperatura y esfuerzo con el cambio de longitud de onda son de ~ 0.016 nm/ $^{\circ}$ C en 1550 nm [1], y ~ 0.006 nm/ $^{\circ}$ C a 800 nm, respectivamente. Las rejillas pueden usarse también para sensar procesos químicos (como el curado de cemento) [1], así como para sensar campos eléctricos.

Además de estas aplicaciones existen muchas más como en acoplamiento de modos, rejillas para modos de radiación fugados, amplificadores de fibra con control de ganancia, etc.

7. Conclusiones

El descubrimiento de la fotosensibilidad nos sugiere una opción para estudiar las propiedades de los defectos en vidrios. Ésta también nos brinda un método práctico para impresión (como se ha explicado) de rejillas de Bragg en fibras ópticas; estas rejillas son usadas a la vez para la fabricación de dispositivos en fibra óptica, utilizados en comunicaciones, así como en el diseño de sensores. En el primero de los casos, para compensar la dispersión del espectro debido a la propagación de este a través de la fibra, también para la creación de fuentes de radiación que pueden surgir de la fibra misma y no de un agente externo a ella. En el segundo de los casos se

pueden utilizar como sensores cuasi-distribuidos dieléctricos, que pueden servir para el diseño de sensores de temperatura en medios electromagnéticos. Estos dispositivos con rejillas también tienen bajas pérdidas al acoplarse y son compatibles con las fibras ópticas usadas en las redes de comunicación.

Agradecimientos

Los autores agradecen infinitamente los comentarios y el apoyo, a este artículo, a los doctores M.A. Meneses-Nava, E.A. Kuzin y J.J. Sánchez-Mondragón, del INAOE, Tonantzintla, Pue.. De igual manera, al Dr. G.E. Torres-Cisneros, de la FIMEE, Salamanca, Gto.

*. Becario de CONACYT.

†. Una rejilla (difractora) es un conjunto de elementos, aberturas u obstáculos, los cuales tienen el efecto de producir alteraciones periódicas en la fase, amplitud, o ambas, de una onda que emerge de ella al incidir de frente. El concepto manejado aquí (en una rejilla de Bragg) es en este sentido, sólo que se considera que el paso de la luz es sobre un costado

1. R. Kashyap, *Optical Fiber Technology* **1** (1994) 17.

2. J.P. McKelvey, *Física del Estado Sólido y de Semiconductores*, octava reimpression (Editorial Limusa, México, 1996).

3. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 5th edition (John Wiley and Sons, Inc. U.S.A., 1976).

4. K.O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, and D.C. Johnson, *Annu. Rev. Mater. Sci.* (1993) 125.

5. G. Meltz, J.R. Dunphy, W.H. Glenn, J.D. Farina, and F.J. Leonberger, *SPIE* **798** (1987) 104.

6. W.W. Morey, G.A. Ball, and G. Meltz, *Optics and Photonics News*, (February, 1994) 8.

7. P. ST J. Ruseell, J. Archambault, and L. Reekie, "Fiber Gratings", University of Southampton, UK.

8. T. A. Strasser, *OFC'96 Technical Digest* (1996) 81.

9. Eric Udd (editor), *Critical Reviews of Optical Science Technology* **CR44** (1992) 103 y 202.

10. Amnon Yariv and Pochi Yeh, *Optical Waves in Crystals*, first edition (Addison-Wesley, U.S.A., 1987).

11. H.H. Cerecedo Núñez, "Caracterización de rejillas de Bragg impresas en núcleo de fibra óptica de vidrio, y aplicación a sensores cuasi-distribuidos de temperatura o esfuerzo". Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, León, Gto., 1995.