



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**FABRICACIÓN DE RPL Y SU APLICACIÓN
COMO SENSORES ÓPTICOS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

JOSÉ ALEJANDRO GRANADOS CHÁVEZ



DIRECTOR DE TESIS:

M.I. ALFREDO BELTRÁN HERNÁNDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA AGOSTO 2013

SINODALES ASIGNADOS

Presidente: Dr. Sergiy Khotyaintsev
Vocal: M.I. Alfredo Beltrán Hernández
Secretario: Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero
1er Suplente: M.I. Juan Carlos Cedeño Vázquez
2do Suplente: M.I. Selene Pérez García

Lugar donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS

M.I. Alfredo Beltrán Hernández

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

- A mi Madre por su apoyo incondicional en todos los aspectos, sin ella simplemente no estaría en estas instancias de mi vida. Cada palabra de ella me forjó para ir por buen camino, pues cada consejo y regaño han dado como fruto uno de los más grandes sueños cumplidos, que se deposita en este trabajo. Ella es mi confidente.
- A mi Padre por su apoyo ilimitado en todos los aspectos, por sus consejos, regaños, desveladas, etc. Él es el principal motor para que este sueño se llevara a cabo, él es un camino a seguir, lo admiro. Con él siempre estaré agradecido pues más que mi Padre, es mi hermano y amigo.
- A mi hermana por su apoyo incondicional y todos sus consejos brindados, ella es un ejemplo de vida a seguir, de ella he aprendido muchas cosas.
- A toda mi familia porque sé que su apoyo incondicional siempre ha estado, yo sé que desde donde están siempre me han mandado su buena vibra (Mercedes Salazar Hernández te llevo en el corazón).
- A mis amigos Alan, Erick y Juan que desde la infancia he contado con ellos y me han apoyado.
- A Paulina porque sé que siempre cuento con ella, las experiencias vividas en esta carrera con ella son inolvidables, simplemente una mujer especial.
- Al M.I. Alfredo Beltrán Hernández por sus consejos, apoyo, dedicación y paciencia para realizar este trabajo de Tesis, pues más que un Profesor o Director de Tesis me brindo su amistad.
- Al Dr. Sergiy Khotyaintsev por permitirme entrar en su equipo de trabajo y hacer uso de las instalaciones a su cargo para el desarrollo de esta tesis.
- A todas esas personas que me han apoyado en este sueño logrado y que me han brindado su amistad en este recorrido.
- A la UNAM por la formación personal y académica adquirida.
- Al Instituto de Investigación en Materiales por prestar sus instalaciones para el desarrollo de la tesis.
- Al proyecto DGAPA-PAPIIT-IN117512 por el apoyo económico brindado.
- Al proyecto DGAPA-PAPIME-PE104811 por el apoyo económico brindado.
- Al proyecto de colaboración conjunta II-FI "Implementación de Fibra Óptica para la Detección de Daño en Estructuras de Concreto".

RESUMEN

En la presente tesis se muestra un trabajo detallado sobre las Rejillas de Periodo Largo (RPL), teniendo como objetivo introducirse al concepto del medio de transmisión de la fibra óptica, para así poder comprender qué son y las características de las RPL, generando una metodología de fabricación de RPL a partir de la técnica de fabricación punto a punto mediante el efecto térmico del haz de un láser de CO₂ de alta potencia, verificando la confiabilidad de este método analizando los resultados y presentando la utilización de las RPL como sensores a la tensión.

Se presentan conceptos teóricos que tienen que ver con el medio de transmisión utilizado para la fabricación de las RPL, con lo que se introduce al lector a lo que es el tema.

La metodología se desglosa detalladamente para su entendimiento una vez que es leído, con imágenes que ayudan a ilustrar lo que se hace a la hora de la fabricación de las RPL.

Los resultados obtenidos se analizan en dos laboratorios distintos para demostrar que la metodología es confiable una vez que en los dos lugares se obtiene lo mismo. Los lugares en donde se lleva a cabo dicha caracterización son el Laboratorio de Comunicaciones Ópticas del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la División de Ingeniería Eléctrica (DIT-DIE) que está a cargo del Dr. Sergiy Khotyaintsev y el Laboratorio de Fibra Óptica del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) a cargo del Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero, actual Secretario Académico de dicho Instituto. Es decir la fabricación se lleva a cabo en la DIT-DIE, pero la caracterización se realiza tanto en la DIT-DIE como en el IIM.

Una vez fabricadas y caracterizadas las RPL se analizan los resultados y se presenta su aplicación como sensores a la tensión.

ÍNDICE:

1.	Introducción	1
1.1.	Antecedentes	1
1.2.	Objetivos	1
1.3.	Metodología de trabajo	2
2.	Fibras ópticas	3
2.1.	Propagación de la luz dentro de la fibra óptica	3
2.2.	Fibras ópticas monomodo y multimodo	6
2.3.	Modos de propagación en una fibra óptica	8
3.	Rejillas en fibras ópticas	9
3.1.	Teoría de Rejillas en fibras ópticas	9
3.2.	Métodos de fabricación de rejillas en fibras ópticas	11
3.3.	Rejillas como sensores ópticos	15
4.	Fabricación y caracterización de muestras	18
4.1.	Retos en la fabricación de RPL	18
4.2.	Descripción de la instalación de fabricación	18
4.3.	Propuesta de metodología de fabricación y caracterización	25
4.4.	Pruebas realizadas en el IIM	33
5.	Resultados del experimento	34
5.1.	Pruebas de las RPL como sensor de cantidades físicas	34
5.2.	Verificación de la viabilidad de medición de cambios de los parámetros físicos	40
5.3.	Rejillas de Periodo Largo no uniformes	44
5.4.	Comparación de resultados teóricos y experimentales	45
6.	Conclusiones	48
7.	Referencias	49

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Las Rejillas de Periodo Largo (RPL) han adquirido gran importancia en el campo de las telecomunicaciones, esto como consecuencia de las diversas aplicaciones que tienen, principalmente al poder ser utilizadas como equalizadores de ganancia, filtros supresores de banda, sensores de tensión, índice de refracción y/o temperatura, etc. [1-5]

Cabe destacar que las RPL tienen muchos parámetros experimentales que afectan su respuesta, estos van desde el tipo de fibra óptica que se utiliza hasta los parámetros de la rejilla: el periodo, el cambio en el índice de refracción a lo largo de la rejilla, el número de periodos, etc. [1-2]

Una parte medular que afecta el comportamiento de las Rejillas de Periodo Largo es la tecnología con la cual se fabrican, en el caso de la fabricación por medio del haz de un láser de Dióxido de Carbono (CO₂) se puede variar el tiempo y la potencia de exposición de grabado, lo que genera distintas variaciones en el índice de refracción a lo largo de la rejilla [6-8].

Actualmente las RPL se encuentran en el campo de investigación y desarrollo tecnológico. Por lo anterior resulta de especial interés su estudio, desde el punto de vista teórico y experimental, ya que el éxito de la fabricación de estos dispositivos es vital para las aplicaciones mencionadas.

En este trabajo se presenta la fabricación de Rejillas de Periodo Largo usando la técnica de fabricación punto a punto mediante el efecto térmico del haz de un láser de CO₂ de alta potencia. Se presenta el uso de las RPL como sensores de tensión. Se verifica la repetibilidad y nivel de confianza de esta tecnología de fabricación.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Definir una metodología de fabricación de Rejillas de Periodo Largo basada en una tecnología de fabricación del haz de un láser de CO₂. Adicionalmente se buscan obtener resultados experimentales del comportamiento de las RPL como sensores ópticos.

Objetivos particulares

- Analizar los parámetros más importantes de la metodología de fabricación con base en la técnica de grabación punto a punto mediante el efecto térmico del haz de un láser de CO₂ de alta potencia.
- Realizar la fabricación de RPL para conocer la eficiencia del método de fabricación con base en la técnica de grabación punto a punto.
- Fabricar muestras de RPL con características espectrales distintas, observando su comportamiento en función de la variación de los parámetros de fabricación.

- Analizar el comportamiento de las RPL fabricadas, y su aplicación como sensores de tensión.

1.3. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo de la presente tesis se fundamenta en los siguientes apartados:

- Ubicación de fuentes bibliográficas confiables con la información relativa a los procesos y tecnologías de fabricación de RPL, así como a la problemática actual de los mismos.
- La fabricación de las Rejillas de Periodo Largo estará basada en la metodología de fabricación punto a punto mediante el uso del haz de un láser de CO₂ [6-9].
- La caracterización de muestras se fundamenta en las técnicas y metodologías existentes en la literatura [6-9].
- Las pruebas de su aplicación como sensores de tensión se realizarán mediante un Analizador de espectros óptico.

2. Fibras ópticas

En la actualidad, la fibra óptica ha tomado importancia por sus características como medio de transmisión por encima de otros, ya que permite un mayor ancho de banda, servicios integrados, mayores aplicaciones, etc. [1-2, 5]. En concreto, las comunicaciones modernas están basadas en este medio de transmisión, pues las comunicaciones ópticas permiten a los usuarios una mejor calidad en los servicios.

Las rejillas en fibra óptica han logrado importantes aplicaciones dentro de las comunicaciones ópticas ya que son de gran utilidad como dispositivos ópticos de línea. Con base en las RPL se pueden fabricar láseres, multiplexores, demultiplexores, ecualizadores de ganancia, filtros ópticos, sensores ópticos de diferentes parámetros físicos, etc. Desde este punto de vista resulta importante su estudio, análisis y fabricación [1-2, 10].

Antes de comenzar con un estudio de las rejillas en fibras ópticas, se considera importante mencionar algunos conceptos básicos de las fibras ópticas.

2.1. Propagación de la luz dentro de la fibra óptica

La fibra óptica está constituida por dos regiones concéntricas, la región interna llamada núcleo con un índice de refracción mayor que el de la parte externa, o cubierta, de esta manera la luz que entra en un extremo de la fibra óptica viaja por el núcleo y no se transfiere a la cubierta debido al principio de la Reflexión Total Interna [11-12].

Cabe mencionar que toda onda luminosa cuenta con su longitud de onda la cual está relacionada con la frecuencia mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- λ es la longitud de onda,
- c es la velocidad de la luz, y
- f es la frecuencia

Como la luz es una onda electromagnética, sus propiedades son descritas mediante las ecuaciones de Maxwell, con las cuales se puede obtener la intensidad y la fase de la onda. Sin embargo, como las ondas que se propagan por la fibra óptica tienen longitudes de onda muy pequeñas (dentro del espectro infrarrojo, visible y ultravioleta), su estudio se puede hacer con el modelo simplificado de rayos luminosos.

Por lo tanto, el estudio de la llegada de una onda luminosa a la superficie entre dos medios con diferente índice de refracción, se puede hacer como un rayo luminoso por medio de la ley de Snell y la reflexión total interna.

Cuando la luz cambia de un medio a otro medio cambia su velocidad de propagación, además la onda refractada cambia su dirección de propagación, el parámetro que define esta característica es el índice de refracción del medio. Los rayos de luz que se propagan en la fibra óptica, e intentan pasar de un medio a otro, se reflejan en la interfaz de ambos medios debido a los diferentes valores del índice de refracción de cada medio. El índice de refracción se define como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la onda luminosa que se propaga en el medio (v), de la siguiente manera:

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{Ec. 2}$$

Los índices de refracción son de vital importancia para el diseño de una fibra óptica, pues como se observará más adelante, existen parámetros que dependen de estos valores y nos indicarán si trabajamos con una fibra óptica monomodo o multimodo.

La Ley de Snell nos indica que para un rayo luminoso que viaja por el primer medio con un ángulo de incidencia θ_1 , dicho ángulo es el que se forma entre la normal a la superficie entre los dos medios y la dirección de propagación, tendremos que el rayo se propagará con un ángulo de refracción θ_2 por el segundo medio, Figura 1 [11-12].

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{Ec. 3}$$

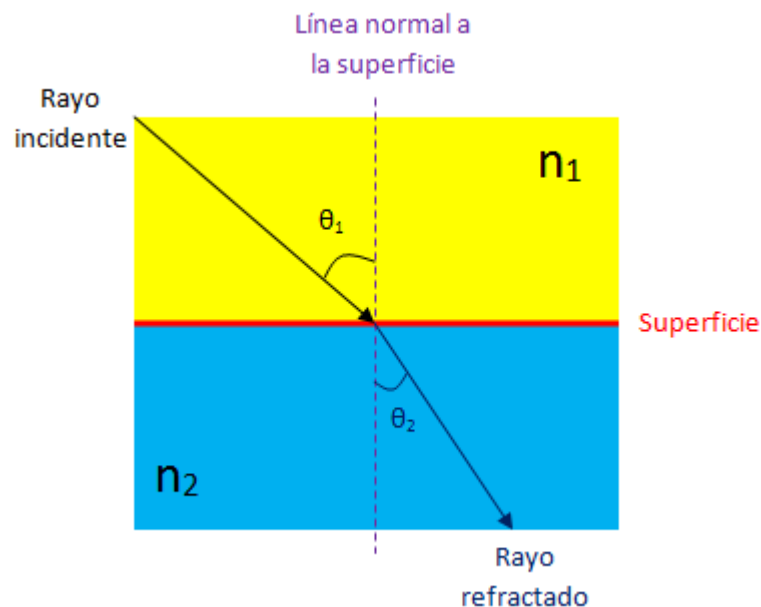


Figura 1. Ley de Snell. Refracción de un rayo luminoso [11-12].

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie de separación entre dos medios de distinto índice de refracción, si el rayo inicialmente viaja por un medio con índice de refracción mayor al siguiente medio, será parcialmente reflejado y parcialmente refractado, Figura 2.

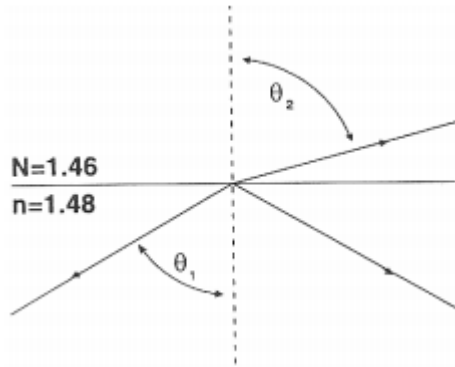


Figura 2. Ley de Snell para índices de refracción determinados. Rayo refractado y rayo reflejado [11-12].

Cabe destacar que si el ángulo θ_1 aumenta, el ángulo θ_2 también aumenta, pero llega el momento en que el ángulo θ_1 es tal que $\theta_2=90^\circ$, haciendo que el rayo luminoso incidente sea totalmente reflejado y no exista refracción, es decir existe una reflexión total, toda la luz se refleja hacia el medio con índice de refracción mayor y no hay refracción hacia el medio con índice de refracción menor.

Por lo anterior, existe un ángulo tal que $\theta_1 = \theta_c$; este ángulo está determinado cuando $\theta_2=90^\circ$, para el cual toda la luz incidente por un extremo de la fibra se propaga. Es decir, para ángulos $\theta_1 > \theta_c$ ocurrirá una reflexión total interna, Figura 3.

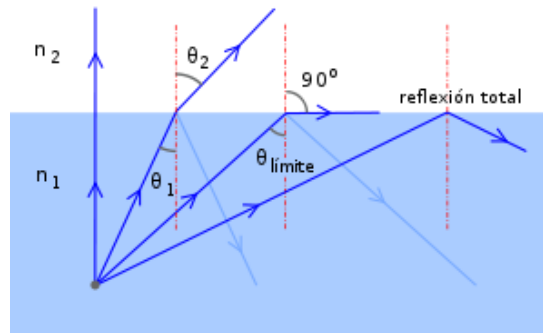


Figura 3. Reflexión total interna [11-12].

Este ángulo está expresado de la siguiente manera:

$$\theta_c = \text{ang} \sin \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Ec. 4}$$

El cual lo podemos expresar en función del ángulo complementario como:

$$\alpha_{\max} = \text{ang} \cos \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Ec. 5}$$

Este ángulo es denominado como ángulo de aceptación y su seno es conocido como la apertura numérica.

$$AN = \sin \alpha_{\max} \quad \text{Ec. 6}$$

Esta denotará el ángulo máximo de incidencia, α_{\max} , con el cual toda la luz que incide en la fibra óptica se propagará totalmente, sin que se produzca refracción solo reflexión. Esto conlleva a que exista una reflexión total interna, que es lo que ayuda a entender el comportamiento de una fibra óptica como una guía de ondas. Para ángulos mayores a α_{\max} se perderá luz incidente por refracción.

El término de apertura numérica se usa para describir la potencia de la fibra para coleccionar luz y para calcular la eficiencia de acoplo entre la fuente y la fibra:

$$AN = \sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{Ec. 7}$$

Lo que interesa es que esta apertura numérica sea grande para aprovechar mejor la fuente luminosa.

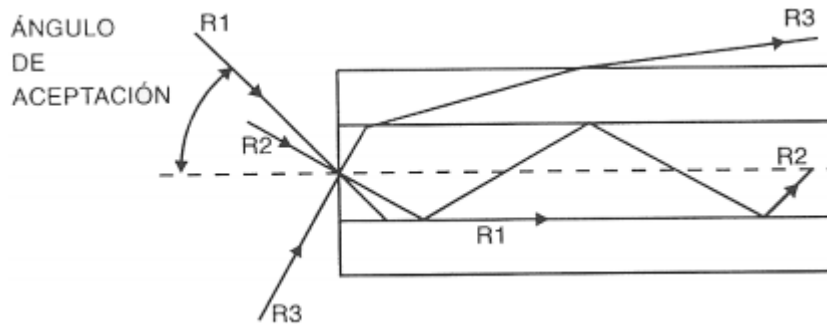


Figura 4. Ángulo de aceptación [11-12].

2.2. Fibras ópticas monomodo y multimodo

La fibra óptica es un medio de transmisión por el cual se envían datos representados mediante pulsos de luz [11-12]. Las fibras ópticas se puede clasificar de diversas maneras, una de ellas se basa en el número de modos que se pueden propagar: fibras ópticas monomodo y fibras ópticas multimodo.

Un modo de propagación se refiere a la forma en que la luz, o los pulsos de luz, son transmitidos en la fibra óptica, es decir son las diferentes trayectorias que puede seguir un haz de luz en el interior de la fibra óptica [11].

La fibra monomodo es aquella en donde sólo se puede propagar un modo, es decir solo existe una trayectoria posible para transmitir la luz. Físicamente, esto se debe a que el diámetro del núcleo es muy pequeño; el diámetro típico para el núcleo y la cubierta de una fibra óptica monomodo es 9 y 125 μm .

Este tipo de fibras están diseñadas para comunicaciones ópticas a larga distancia (hasta 1200 km, con una fuente de alta intensidad) ya que el modo fundamental se propaga directamente sin reflexión de manera paralela al eje de la fibra, lo que hace que tenga un ancho de banda elevado y pueda alcanzar elevadas tasas de transmisión (del orden de Gbits por segundo) [13].

Las fibras multimodo son aquellas por las que se propaga más de un modo, tienen un diámetro mayor del núcleo en comparación con las fibras monomodo; los valores típicos del diámetro del núcleo son

50 y 62.5 μm . Estas fibras ópticas son comúnmente utilizadas en aplicaciones de distancias cortas, del orden de decenas de kilómetros [14]. Una característica de este tipo de fibras ópticas es que no todos los modos que se propagan llegan al mismo tiempo al destino, esto se debe a que algunos se reflejan un número mayor de veces a lo largo de la fibra óptica.

Otra de las clasificaciones de las fibras ópticas se basa en la distribución del índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica. De este punto de vista tenemos: 1. Fibras ópticas de índice escalonado (salto de índice), la distribución del índice de refracción en el núcleo es constante en toda la sección cilíndrica, estas fibras tienen una alta dispersión modal; 2. Fibras ópticas de índice gradual, la distribución del índice de refracción del núcleo no es constante en la sección cilíndrica, ya que el núcleo está compuesto por diferentes materiales, tiene menor dispersión modal y se caracterizan porque la distribución del índice de refracción va disminuyendo de forma gradual según nos alejamos de forma radial del centro del núcleo, Figura 5.

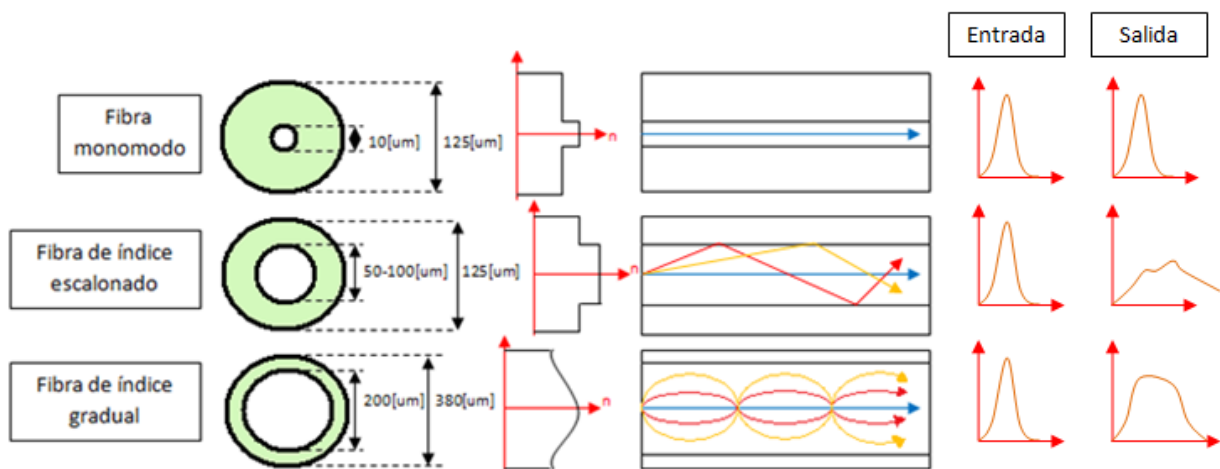


Figura 5. Clasificación de las fibras ópticas de acuerdo a la distribución del índice de refracción en el núcleo [11-12].

Para diferenciar entre una fibra óptica monomodo de índice escalonado y una fibra óptica multimodo de índice escalonado, es posible utilizar el parámetro de la frecuencia normalizada:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} AN \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

- V es la frecuencia normalizada,
- a es el radio del núcleo de la fibra óptica,
- λ es la longitud de onda de trabajo,
- n_1 es índice de refracción del núcleo,
- n_2 es el índice de refracción de la cubierta, y
- AN es la apertura numérica

Dado que la frecuencia normalizada es una relación entre la frecuencia real y un valor de referencia [11-12], es posible establecer este parámetro como un criterio para saber si se tiene una fibra óptica monomodo o multimodo [11-12]:

$$\begin{aligned} 0 < V \leq 2.405 & \quad \text{Fibra óptica monomodo} \\ V > 2.405 & \quad \text{Fibra óptica multimodo} \end{aligned} \quad \text{Ec. 9}$$

La fórmula que relaciona la frecuencia normalizada con el número de modos, M , que se propagan por una fibra óptica de índice escalonado es la siguiente:

$$M = \frac{V^2}{2} = \left(\frac{\pi a}{\lambda} AN \right)^2 \quad \text{Ec. 10}$$

2.3. Modos de propagación en una fibra óptica

En términos prácticos un modo representa como se propaga la luz dentro de una fibra óptica [11-12].

En una fibra óptica se presentan los modos tradicionales, es posible tener modos TE_{lm} , modos TM_{lm} , modos EH_{lm} y modos HE_{lm} . La nomenclatura de los modos de forma tradicional es complicada debido a la gran cantidad de modos que se pueden presentar en una fibra óptica, para esto existe una solución más sencilla si se considera a la fibra óptica como un medio de comunicación de guiado débil, lo que significa que los ángulos de aceptación serán pequeños y por lo tanto los ángulos dentro de la fibra con respecto al eje de esta son pequeños también.

Por lo anterior los modos de propagación pueden tener constantes de propagación muy parecidas y se pueden considerar casi iguales, a esto se le conoce como modos degenerados. A la superposición de los modos degenerados se le conoce como modos Linealmente Polarizados o modos LP. Esta nomenclatura es más sencilla para trabajar, en la Tabla 1 se muestran las correspondencias entre los modos LP y los modos tradicionales.

Tabla 1. Correspondencia entre modos LP y modos tradicionales [11].

Modos Linealmente Polarizados	Modos tradicionales
LP_{01}	$HE_{11} \times 2$
LP_{11}	$HE_{21}, TE_{01}, TM_{01} \times 2$
LP_{21}	$HE_{31} \times 2, EH_{11} \times 2$
LP_{02}	$HE_{12} \times 2$
LP_{31}	$HE_{41} \times 2, EH_{21} \times 2$
LP_{12}	$HE_{22}, TE_{02}, TM_{02} \times 2$
LP_{lm}	$HE_{2m}, TE_{0m}, TM_{0m} \times 2$
$LP_{lm} (l \neq 0 \neq 1)$	$HE_{l+1,m} \times 2, EH_{l-1,m} \times 2$

3. Rejillas en fibras ópticas

3.1. Teoría de rejillas en fibras ópticas

El principal factor que influyó para que aparecieran las rejillas de periodo largo es el descubrimiento de la fotosensibilidad que existe en las fibras ópticas [15]. Con la ayuda de radiación ultravioleta, a cierta longitud de onda, se puede modificar el índice de refracción a lo largo de la fibra, ya que la fotosensibilidad lo permite [15].

Una forma sencilla de definir una rejilla en fibra óptica es la siguiente: es la modulación del índice de refracción en el núcleo y/o de la cubierta en determinada extensión de la fibra óptica.

En general existen dos tipos de rejillas, las Rejillas de Bragg (Fiber Bragg Gratings, FBG) y las Rejillas de Periodo Largo (Long Period Fiber Gratings, LPFG), la principal diferencia entre ellas es el periodo, es decir la separación entre las variaciones del índice de refracción que se generan; se puede decir que las del primer tipo tienen un periodo de modulación de aproximadamente la mitad de la longitud de onda de la señal óptica incidente, mientras que las segundas contienen un periodo centenas de veces mayor que la longitud de onda de dicha señal [1-2, 16-17].

Existe una condición indispensable para entender el funcionamiento de las rejillas de periodo largo, la condición de Bragg. Esta condición nos dice que al modular el índice de refracción en el núcleo lo que se provoca es un intercambio de energía, también conocido como acoplamiento entre modos de la fibra óptica. Cada pulso lo que hace es difractar la luz que viaja por el núcleo de la fibra, es decir la esparce; lo que nos dice la condición es que dichas difracciones se sumarán constructivamente si se cumple lo siguiente:

$$\beta_1 - \beta_2 = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- β_1 es la constante de propagación del modo fundamental del núcleo de la fibra,
- β_2 es constante de propagación del modo con el cual ocurre el acoplamiento, y
- Λ es el periodo.

En caso de que esta condición no llegue a satisfacerse, las difracciones en cada periodo tendrán diferente fase hasta que se cancelen por completo.

Como las FBG tienen un periodo menor que la longitud de onda de la señal incidente, la condición anterior se cumple para el modo fundamental del núcleo de la fibra (modo incidente) y el mismo modo pero de propagación contraria, es por eso que la luz que llega a la rejilla se refleja pues se produce el acoplamiento generando la reflexión máxima a una determinada longitud de onda de resonancia, λ_r , [16-17]:

$$\lambda_r = 2n_1\Lambda \quad \text{Ec. 12}$$

En general se considera que la constante de propagación y el índice efectivo están relacionados de la siguiente manera [11-12]:

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad \text{Ec. 13}$$

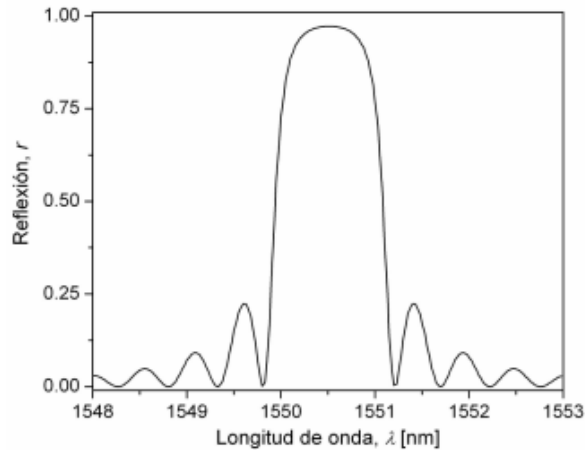


Figura 6. Espectro de reflexión de una rejilla de Bragg [16-17].

Como las RPL tienen un periodo cientos de veces mayor que la longitud de onda de la señal incidente, la condición de Bragg se satisface para el modo fundamental y distintos modos de la cubierta con la misma dirección de propagación, es decir, cuando la señal viaja por el núcleo y comienza a interactuar con la rejilla se genera difracción debido al acoplamiento del modo del núcleo con uno o varios modos de la cubierta. Este acoplamiento genera bandas de atenuación, cuya longitud de onda de resonancia se puede determinar a partir de la ecuación 14 [1-2].

$$\lambda_r = (n_1 - n_2) \Lambda \quad \text{Ec. 14}$$

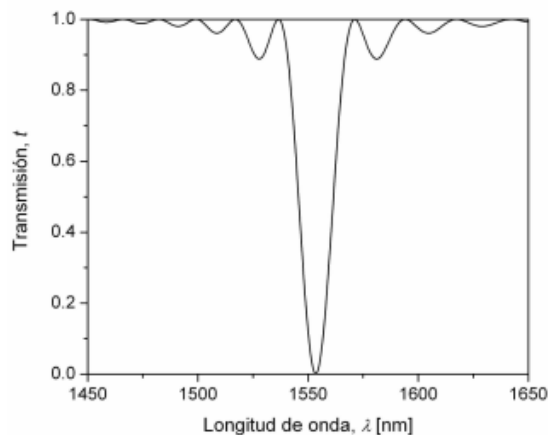


Figura 7. Espectro de transmisión de una RPL [1-2].

El comportamiento de las Rejillas de Periodo Largo, según el modo de la cubierta con el que se acopla, se presenta en la Figura 8.

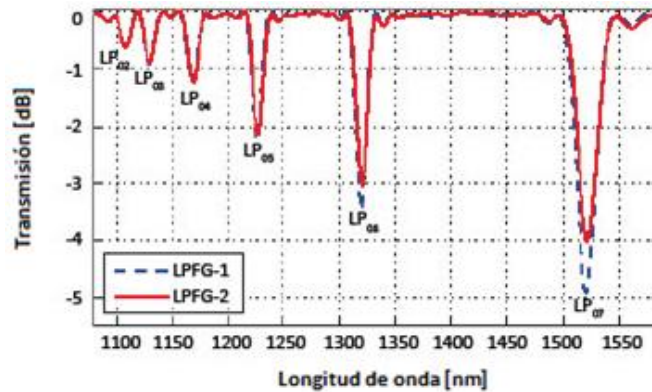


Figura 8. Comportamiento de una RPL según el modo de la cubierta con el que se acopla [1-2].

Cabe destacar que existe un parámetro que relaciona el nivel de la banda de atenuación, el coeficiente de acoplamiento, κ , el cual determina que tanta luz es acoplada del modo del núcleo con un modo de la cubierta. La condición que nos proporciona un nivel de atenuación máximo para una RPL es la siguiente:

$$\kappa L = \frac{\pi}{2} \quad \text{Ec. 15}$$

En donde L es la longitud total de la rejilla.

Es posible clasificar a las rejillas en fibras ópticas, independientemente si se trata de FBG o RPL, de acuerdo a sus parámetros (periodo de la rejilla, longitud de la rejilla, coeficiente de acoplamiento, fase):

- *Rejilla uniforme*: se mantienen constantes todos sus parámetros a lo largo de toda la rejilla [1-2].
- *Rejilla no uniforme*: tiene variaciones de al menos uno de sus parámetros a lo largo de toda la rejilla [18-19].
- *Rejilla inclinada*: la característica de este tipo de rejillas es que al momento de ser fabricadas se colocan con un determinado ángulo de inclinación [20-21].
- *Rejilla helicoidal*: en estas rejillas la modificación del índice de refracción longitudinal no es en un solo plano de la fibra, se hace una especie de giro o torsión para generar una modulación circular del índice de refracción [22].

3.2. Métodos de fabricación de rejillas en fibras ópticas

- Inscripción mediante un haz sencillo

Esta técnica fue la causa por la cual se descubrió la propiedad de fotosensibilidad en la fibra óptica. La técnica está basada en un haz de luz láser monomodo a 488 nm y fue descubierta en 1978 [15]. El funcionamiento se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Diagrama del método inscripción mediante un haz sencillo [15].

La rejilla se forma debido a la reflexión que se da al final de la fibra, esta señal reflejada produce un patrón interferencia en el núcleo pues viaja en sentido contrario al haz emitido por el láser. Dicho patrón tiene una periodicidad dada por $\lambda/2n$, donde λ es la longitud de onda a la que trabaja el láser y n es el índice de refracción del núcleo en el modo de la longitud de onda emitida por el láser.

Con esto se genera una modificación del índice de refracción en determinadas zonas, así la reflexión aumenta con el tiempo, por lo que las variaciones también aumentan. Esta técnica es utilizada comúnmente para fabricar rejillas de Bragg.

- Interferometría o técnica holográfica

Es una técnica que se usa principalmente en la fabricación de rejillas de Bragg, fue descubierta en 1989 [23]. Sus componentes son un láser, un separador de luz u espejos. El separador de luz genera dos rayos los cuales llegan a un mismo punto con un ángulo θ , en este punto se genera un patrón de interferencia que se graba en el núcleo de la fibra.

Este método presenta muchas dificultades ya que las mínimas variaciones que se presentan a la hora de aplicarlo producen grandes variaciones en el patrón de interferencia.

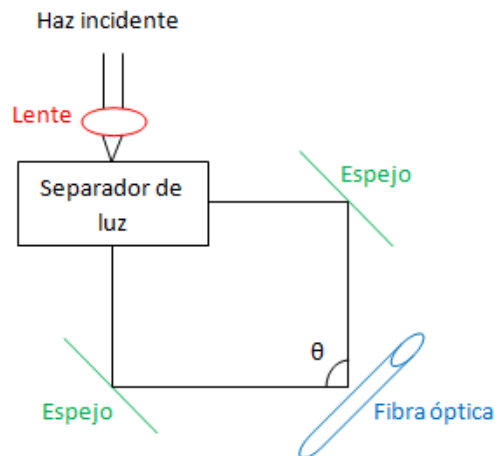


Figura 10. Diagrama del método interferometría [23].

- Mascarilla de fase

El método está basado en la fotolitografía, se desarrolló en 1993 [24], el funcionamiento se basa en una mascarilla de fase que funciona como el patrón de interferencia que es transferido al núcleo. El periodo de dicha mascarilla depende de la rejilla deseada, siendo este de valores micrométricos o mayores. El funcionamiento de este método se muestra en la Figura 11.

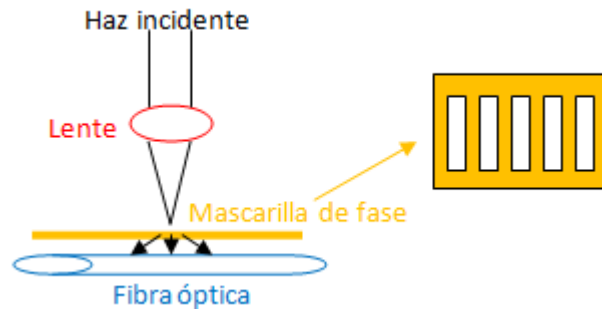


Figura 11. Diagrama del método mascarilla de fase [24].

- Punto a punto

Esta técnica fue descubierta en 1993 [25], sirve para fabricar rejillas de Bragg y de periodo largo. Consiste en utilizar un láser para modificar el índice de refracción de una zona específica de la fibra óptica, el haz de dicho láser debe estar perpendicular a la fibra, se tiran pulsos con este láser y se va moviendo la fibra de manera periódica y paralela al eje de la misma, el número de pulsos que se le tiren va a depender del número de periodos que sean necesarios para la rejilla. El principal problema de este método es la necesidad de una unidad de desplazamiento de alta precisión para mover la fibra óptica.

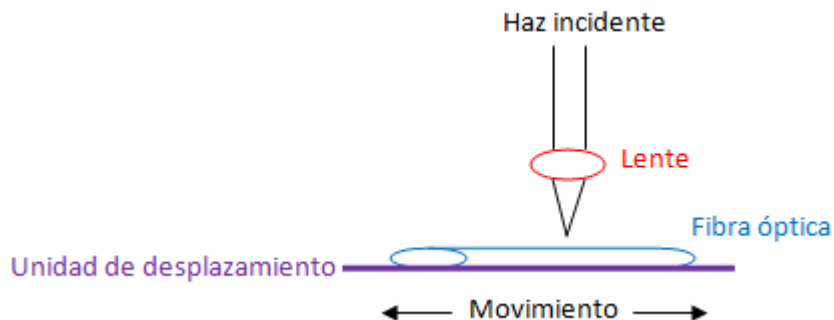


Figura 12. Diagrama del método punto a punto [25].

Dentro de las técnicas de punto a punto destacan las siguientes:

- Descargas de arco eléctrico con los electrodos de una empalmadora [9, 26]

Generalmente las empalmadoras se usan para unir dos fibras ópticas, con ayuda de una fuente de alto voltaje, un par de electrodos y motores para ayudar a empujar las fibras a la hora de la fusión. Debido a que las empalmadoras generan descargas eléctricas capaces de modificar la geometría y forma de las fibras ópticas, es posible la fabricación de rejillas de periodo largo aplicando periódicamente descargas de arco eléctrico en una sección de la fibra. El resultado es una modulación del índice de refracción a causa del cambio de la estructura de la fibra óptica.

En este método son importantes los parámetros de tiempo de exposición y la potencia de arco eléctrico; tienen que ser previamente calculados y cargados por medio de un programa grabado en la

empalmadora. Otro parámetro importante es el periodo de la variación del índice de refracción del núcleo ya que determinará la longitud de onda de filtrado de la rejilla. Típicamente se coloca una masa con un peso determinado en un extremo de la fibra óptica, esto es para mantener la fibra tensa y evitar microcurvaturas al momento de aplicar las descargas del arco eléctrico.

Una de las principales ventajas de este método es que se puede medir la transmisión óptica de la rejilla, y así optimizar la calidad de esta. Para esto se utiliza un diodo láser sintonizable y un detector que se conecta a una computadora. En la Figura 13 se muestra el arreglo experimental.

Este método de fabricación de RPL ha sido estudiado en diferentes artículos, pero el costo elevado de las empalmadoras hace que el proceso de fabricación sea relativamente caro.

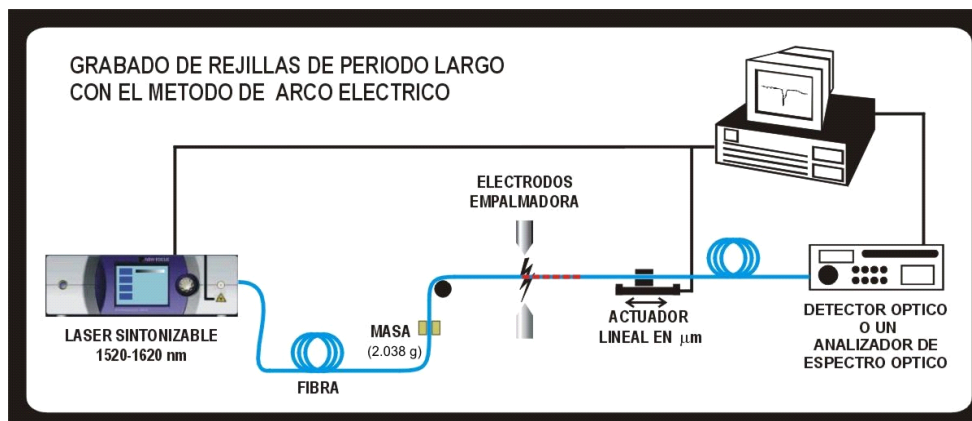


Figura 13. Arreglo experimental del método de descargas de arco eléctrico con los electrodos de una empalmadora [9].

- Láser de CO₂

En este método de fabricación se utiliza como elemento principal de grabado el haz de un láser de CO₂, la técnica se complementa con la grabación punto a punto a lo largo de la fibra óptica, de esta forma se generan las perturbaciones del índice de refracción, y con ello se induce la rejilla con las características deseadas [3].

Cuando se habla de procesamiento de la fibra óptica por medio de un láser de CO₂, se manejan tres partes fundamentales: una computadora con software especializado capaz de diseñar y enviar datos; hardware que incluye al propio láser de CO₂, el sistema opto-mecánico capaz de controlar la trayectoria del haz y hacer movimientos con la fibra óptica; y el espacio para el material a procesar, en este caso la fibra óptica.

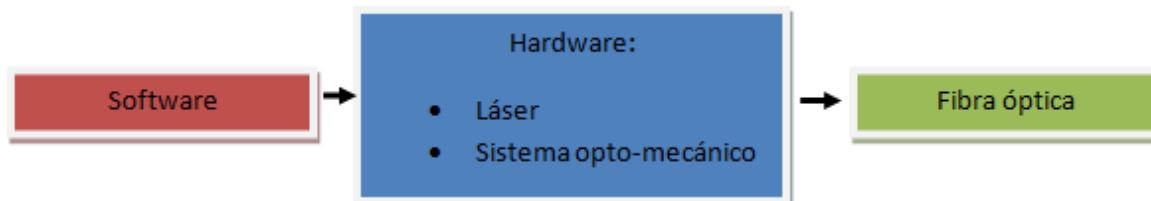


Figura 14. Elementos de la técnica del Láser de CO₂.

En este método lo que se hace es ir grabando puntos a lo largo de la fibra para generar perturbaciones en el índice de refracción, y así formar la rejilla con las características deseadas.

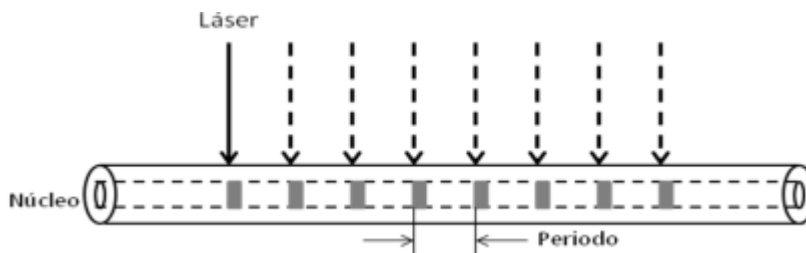


Figura 15. Fabricación de RPL mediante un láser de CO₂ [3].

Las ventajas que presenta este método de fabricación son la posibilidad de diseñar y realizar patrones complejos, por ejemplo rejillas aperiódicas. Otra de las ventajas es el tiempo de fabricación y la caracterización *in situ*.

3.3. Rejillas como sensores ópticos

Una de las principales aplicaciones de las Rejillas de Período Largo se presenta en el área de la instrumentación como sensores de diversos parámetros físicos como la temperatura, el índice de refracción, la tensión, etc. [1-2, 16].

Esta aplicación se debe a que las RPL son capaces de modificar su longitud de onda de resonancia cuando en el exterior existe un fenómeno físico capaz de modificar la estructura de la fibra óptica [1-2, 16]. Dicho cambio en la longitud de onda de resonancia será observado con facilidad pues el equivalente del espectro de una rejilla es el de un filtro supresor de banda.

Actualmente los sensores basados en rejillas en fibra óptica son de gran importancia porque presentan varias ventajas sobre los sensores eléctricos convencionales, estas son [1-2, 16]:

- Tienen dimensiones pequeñas, normalmente de 125 μm de diámetro, lo que permite que puedan ser incrustados en otros materiales sin cambiar las propiedades mecánicas de estos últimos.
- El material de la fibra óptica (típicamente dióxido de silicio, SiO₂) es un material dieléctrico pasivo, lo que hace que pueda ser incrustado en materiales como el carbón o el termoplástico donde las descargas eléctricas son un peligro, además por sus propiedades pasivas naturales de estos sensores pueden ser introducidos en materiales metálicos.
- Estos sensores pueden ser elaborados para soportar propiedades físicas como la presión, temperatura y tensión.
- En una misma línea de fibra óptica se pueden encontrar varios sensores, es decir pueden ser multiplexados.
- La mayoría de estos sensores son elaborados para tener un alto grado de inmunidad hacia la interferencia electromagnética, con lo que se eliminan costos pues se elimina la necesidad de una voluminosa capa de protección.

Cabe destacar que las RPL han logrado un incremento presencial en aplicaciones de detección de cambio en diversos parámetros físicos, ya que tienen una ventaja muy importante sobre las rejillas de Bragg, pues son más fáciles de fabricar.

Los sensores de fibra óptica son una tecnología muy avanzada que permite a los ingenieros agregar una especie de sistema nervioso central a sus diseños, permitiendo el monitoreo de estos y detectando daños.

Los sensores basados en fibra óptica utilizan la luz para detectar una perturbación en el exterior de la fibra, la configuración general de un sensor se muestra en la Figura 16.

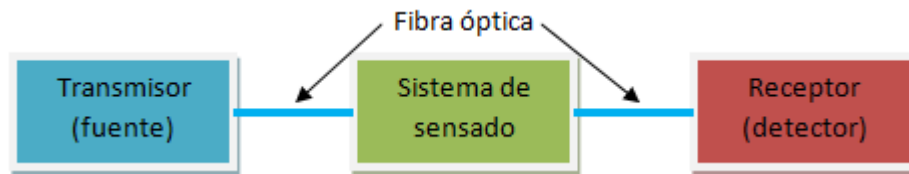


Figura 16. Configuración general de un sensor.

Estos sensores en función de cómo realicen la medición de la perturbación externa se clasifican en dos grandes clases: intrínsecos y extrínsecos.

Sensores intrínsecos

Estos sensores utilizan la fibra óptica como guía de onda hasta el lugar en donde se va a medir la magnitud requerida, la perturbación externa actúa directamente sobre la fibra. La luz siempre permanece dentro de la fibra.



Figura 17. Sensor intrínseco.

Sensores extrínsecos

En estos sensores la fibra óptica actúa solo como guía de onda para llevar la señal hasta un elemento que modula el haz en respuesta al parámetro que se quiere medir, se modula por algún método en particular y la fibra solo sirve para conducir la señal desde la fuente hasta el dispositivo sensor y de este al receptor. La información puede estar codificada en intensidad, fase, frecuencia, estado de polarización, etc.

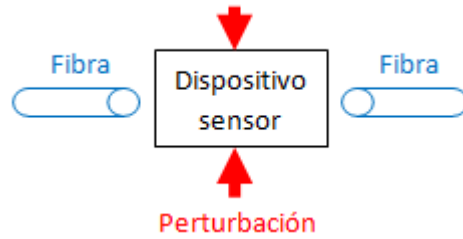


Figura 18. Sensor extrínseco.

Como ya hemos mencionado las rejillas en fibra óptica se pueden utilizar como sensores de cantidades físicas como la presión, la temperatura, la tensión, etc. existen varias aplicaciones de estos sensores, entre las que destacan:

- Hidrófonos para los sismos y aplicaciones de sonido
- Sensores para temperatura y presión en pozos petrolíferos
- Detección de fisuras en paredes de concreto
- Detección de tensión en bardas de concreto

4. Fabricación y caracterización de muestras

El método empleado para la fabricación de las rejillas de periodo largo es con base en la técnica de grabación punto a punto mediante el efecto térmico del haz de un láser de CO₂ de alta potencia. La idea de utilizar esta tecnología láser, se fundamenta en las ventajas que tiene respecto a las demás técnicas de fabricación [10].

A continuación se presentan los detalles de la fabricación y caracterización de las RPL fabricadas.

4.1. Retos en la fabricación de RPL

El proceso de fabricación paso por diferentes etapas para llegar a los resultados deseados:

- Se utilizó fibra óptica SMF-28 de la marca Thorlabs, sin obtener los resultados esperados en el espectro, pues la fibra no era muy resistente y a la hora de tirar los pulsos esta sufría grandes modificaciones en su estructura, llegando a su ruptura.
- Se observó que el haz láser no estaba alineado con la fibra lo que provocaba que incrementáramos la potencia y el tiempo de exposición para que se generaran modificaciones en la fibra lo que hacía que se rompiera pues estos valores eran muy elevados, por lo que se adaptó la instalación para una mejor alineación de la fibra óptica con el haz del láser de CO₂.
- Una vez que el haz del láser quedó alineado con la fibra óptica, se hicieron pruebas con la misma fibra SMF-28 de la marca Thorlabs, pero no funcionó, no se obtenían los resultados deseados.
- Se optó por cambiar la fibra óptica por una SMF-28 de la marca Corning, haciendo diversas pruebas para diferentes valores en los parámetros de potencia, tiempo de exposición, periodo y número de periodos. Se observó que esta fibra óptica ya era más resistente a la emisión de pulsos del láser, pues las fibras que llegaban a su ruptura se minimizaron.
- Con esta fibra SMF-28 Corning, con la adaptación de la instalación del láser de CO₂ y con determinados valores en los parámetros se obtuvieron los mejores resultados.

4.2. Descripción de la instalación de fabricación

La instalación para la fabricación de RPL utilizada cuenta con las etapas que se mencionan al explicar dicho método, Figura 14.

Software

El control del haz láser de alta potencia se realiza mediante una computadora que tiene las siguientes etapas:

- Matlab

Mediante este paquete se realizó un programa con la finalidad de introducir todos los parámetros para la fabricación de la rejilla: Potencia, tiempo de exposición, periodo y número de periodos.

- Potencia

Este parámetro indicará al láser con que potencia va a emitir los pulsos sobre la fibra, está dado en porcentaje. La potencia que se pone en la ventana que despliega el programa no es la potencia con la que salen los pulsos del láser, en realidad la potencia que sale del láser es la mitad de la potencia que se le puso en dicha ventana.

- Tiempo de exposición

Nos indica el tiempo que va a durar la emisión del láser, es decir el tiempo de duración del pulso. Entre cada pulso y movimiento del láser es necesario esperar determinado tiempo para lanzar el siguiente pulso.

- Periodo

Este parámetro es el valor teórico obtenido con los datos de la fibra óptica y la longitud de resonancia deseada. Nos indica la separación que habrá entre cada uno de los pulsos emitidos por el láser, es considerado como el parámetro más importante pues de este dependerá el comportamiento de la RPL. Para generar el desplazamiento deseado se tiene una unidad de desplazamiento de alta precisión donde se coloca la fibra óptica y mediante del controlador de la unidad de desplazamiento, y la integración utilizando LabView, es posible generar este movimiento de forma automática.

- Número de periodos

Es el parámetro que le indica al láser de CO₂ cuantos pulsos va a emitir. Ya que un periodo es la distancia que hay entre dos pulsos, el número total de pulsos que tirará el láser será el número de periodos más uno.

Una vez que ya se colocan estos parámetros se genera el documento de control del láser.

- PI LANCE 230

Este paquete es el que sirve para mover la base del láser, es una unidad de desplazamiento. Es de gran ayuda ya que se puede mover a conveniencia, aunque su movimiento es solo en un eje en ambas direcciones. Tiene opciones para mover la base tres distancias diferentes en ambas direcciones y también cuenta con opciones para definir desde donde el láser va a comenzar a tirar los pulsos, es a lo que se le llama en este paquete como DH "define home" y para ir a donde se definió el inicio, conocido como GH "go home".

En realidad este paquete solo se utiliza para definir la casa (DH), es decir indicarle al láser de donde va a empezar a tirar los pulsos para la fabricación de las rejillas de periodo largo, y una vez que termina de realizar una rejilla iniciará la fabricación de la otra cuando uno se lo indique en este mismo punto que se definió como inicio, a menos que se vuelva a definir otra casa con los botones de movimiento de base, y una vez que esté en el lugar deseado oprimir DH.

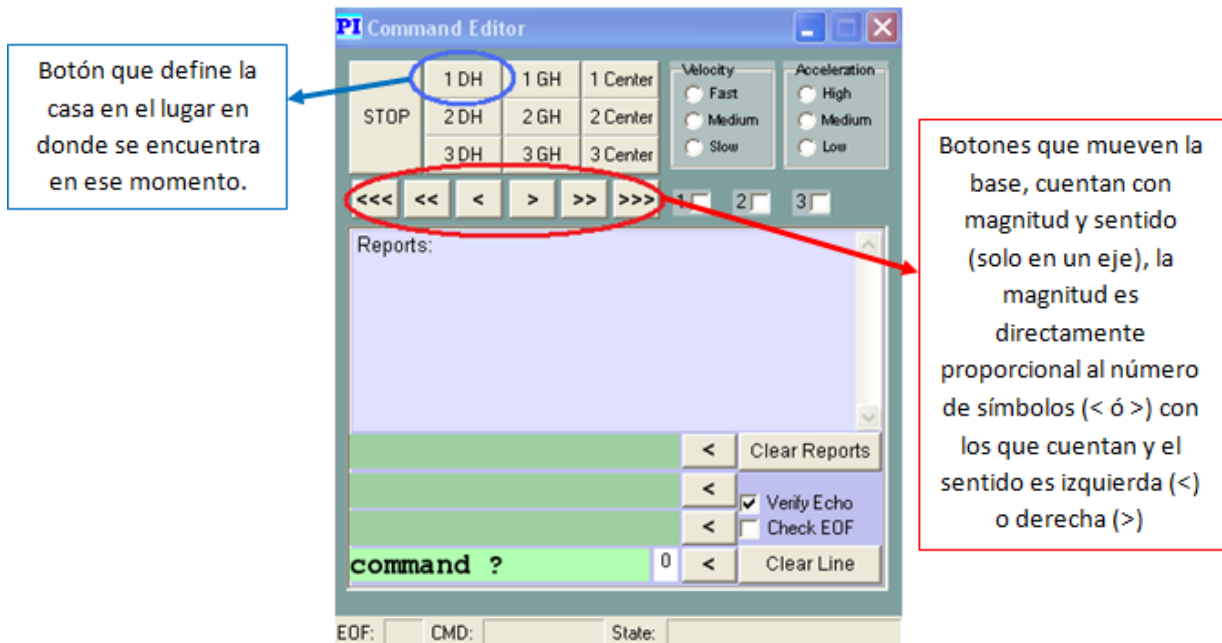


Figura 19. Ventana que despliega el paquete PI LANCE230.

- LABVIEW

Con ayuda del programa LabView se debe de activar el láser mediante un comando para iniciar el proceso de fabricación. Este proceso se puede interrumpir en cualquier instante de la grabación de la rejilla. Este programa integra el programa generado mediante MatLab con el controlador de la unidad de desplazamiento y el control remoto del láser de CO₂.

Hardware

Aquí es en donde se encuentra la parte esencial del método que se utilizó, el método de láser de CO₂, ya que en esta parte se encuentra el láser, pues sin este no se podría llevar a cabo este método, sin dejar a un lado el sistema opto-mecánico.

- Láser de CO₂

Cabe mencionar que los láseres de CO₂ son muy antiguos, fue desarrollado por Kumar Patel en los laboratorios Bell en 1964 [27]. Hoy en día tienen una fuerte cantidad de aplicaciones debido a que son de gran poder, son de fácil accesibilidad y son muy eficientes.

El láser de CO₂ utilizado para este trabajo emite pulsos a una longitud de onda de 10.6 μm, la potencia máxima es de 25 W.

Por seguridad el láser cuenta con una llave que es la encargada de permitir el funcionamiento de éste. La ventaja de este tipo de láseres radica en que el control es muy sencillo y permite emitir pulsos controlados.

Entre las precauciones que se deben tomar con el uso del láser destacan las siguientes:

- No mirar directamente el haz que emite el láser.
- Usar lentes que sirvan como filtro del haz.
- Parar el tirado de pulsos antes de introducir las manos en el sistema mecánico.
- Poner la llave en la posición de apagado mientras no se usa.

➤ Sistema opto-mecánico

El funcionamiento del láser se puede separar en dos sistemas, un sistema óptico que es el encargado de que los pulsos emitidos puedan llegar, y modificar, la fibra óptica y el sistema mecánico que se encarga de ajustar y mover la fibra óptica.

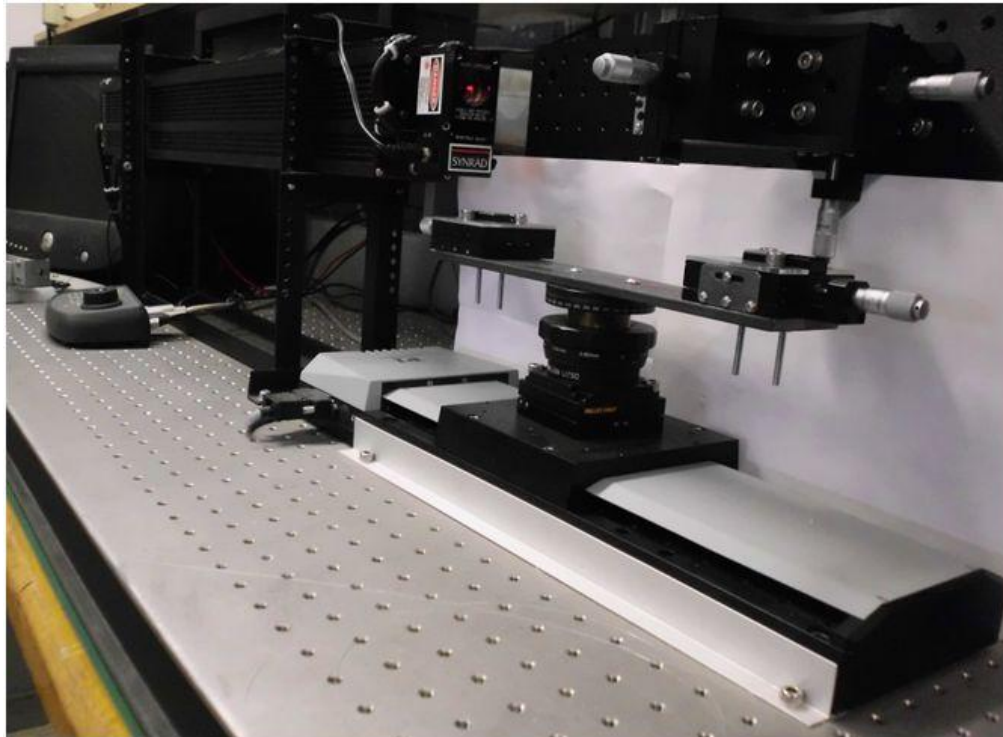


Figura 20. Instalación para la fabricación de RPL mediante un láser de CO₂.

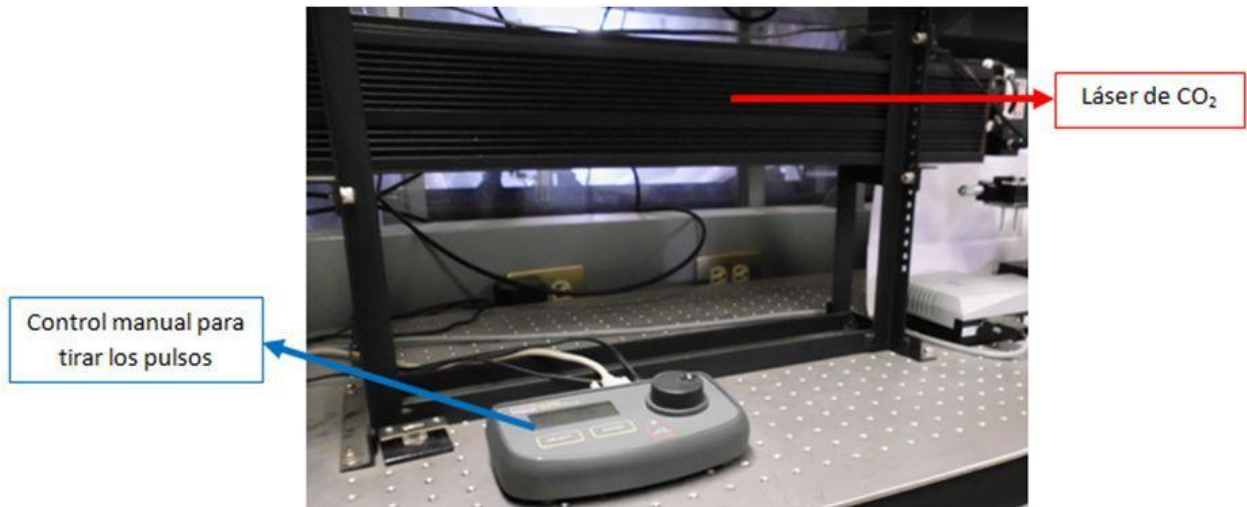


Figura 21. Sistema óptico del láser de CO₂.

El láser de CO₂ es el encargado de emitir los pulsos y puede ser controlado por el software o de forma manual.



Figura 22. Sistema mecánico del láser de CO₂.

En general, existen varias partes dentro de este sistema mecánico que valen la pena destacar, ya que son de gran ayuda e importancia a la hora de la fabricación de las rejillas.

- Unidad mecánica de desplazamiento vertical.

Con este ajuste los pulsos que emite el láser dan exactamente en la fibra óptica, ya que el foco de la lente utilizada coincide con la fibra óptica. Las bases se colocaron para ajustar la altura de la base donde se coloca la fibra óptica.



Figura 23. Bases de metal con base giratoria para el desplazamiento vertical.

- Tensado de la fibra.

Para el mejor manejo de la fibra que será utilizada para la fabricación de las rejillas se cuenta con una placa metálica con dos unidades de desplazamiento, una en cada extremo de la placa. Estas placas permiten generar tensión a la fibra óptica y con ello conocer el comportamiento espectral a los cambios de la tensión.

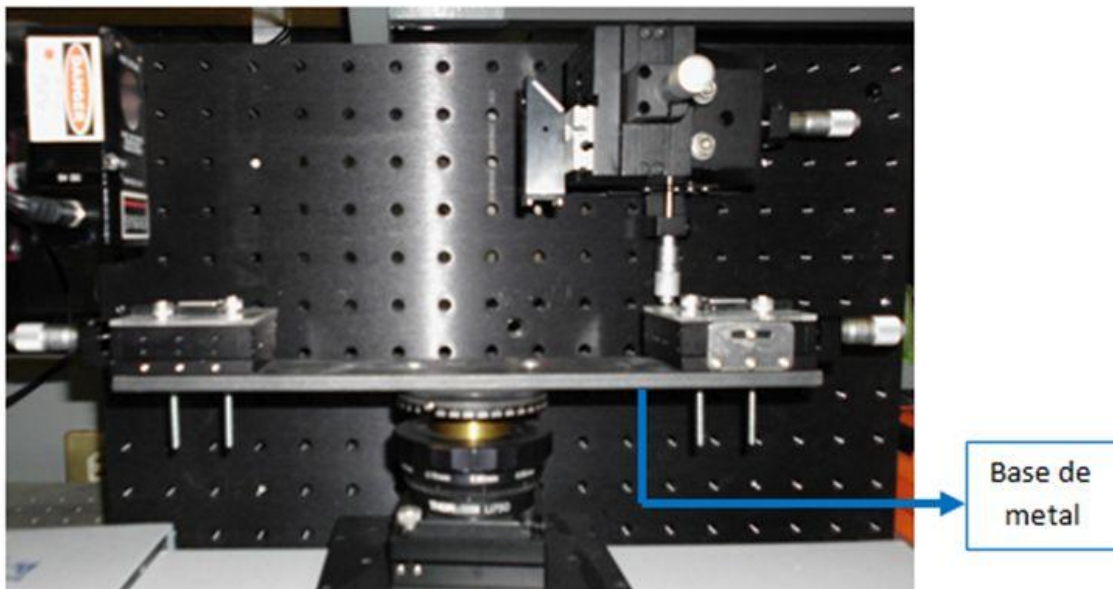


Figura 24. Base metálica para sostener la fibra óptica.

- Sujetadores.

Con unas piezas de acrílico se le da soporte a los sujetadores de la fibra óptica desnuda, estas piezas deben contener las medidas exactas para que dichos sujetadores no se muevan.

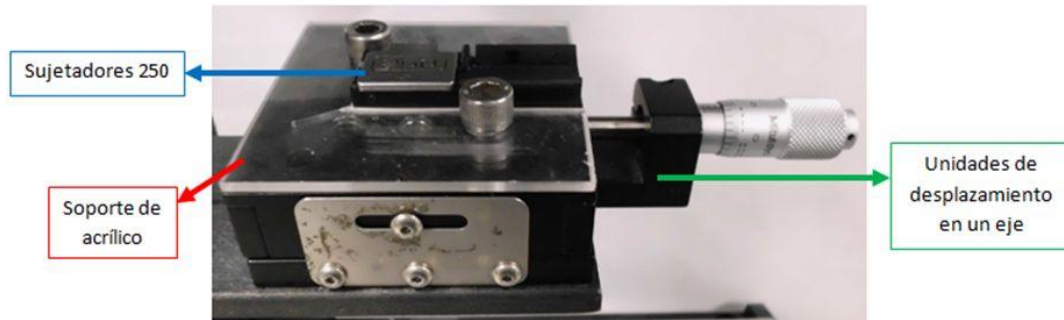


Figura 25. Sujetador, soporte de acrílico y unidades de desplazamiento.

Una de las etapas más finas del proceso de fabricación es la posición de los sujetadores pues nos permiten alinear la fibra óptica y que todos los pulsos emitidos por el láser den directamente en la fibra. Cualquier ligero movimiento puede desalinear la fibra óptica provocando que no se realice la fabricación de la RPL.

Se recomienda que si no está alineada la fibra a la hora de tirar los pulsos, se realicen pruebas con fibras de plástico ya que como están más gruesas se puede analizar mejor el comportamiento de los pulsos e ir variando esta alineación con la base giratoria.

Fibra óptica

Para realizar las RPL se utilizó fibra SMF-28 con cubierta de plástico de la empresa Corning, esta fibra óptica está diseñada para aplicaciones en la segunda y tercera ventana de transmisión (1310 nm y 1550 nm).

El espectro de atenuación de la fibra SMF-28 es el siguiente:

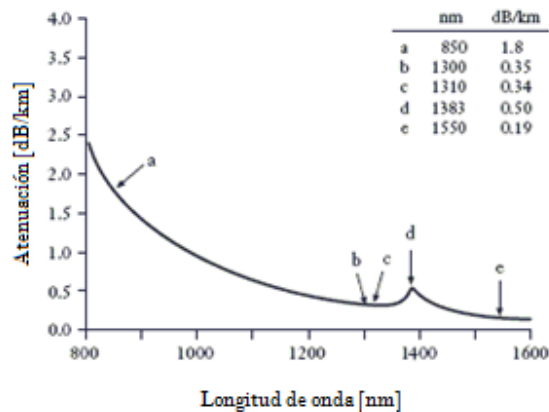


Figura 26. Espectro de atenuación de la fibra SMF-28 [28].

Entre las características importantes de esta fibra destacan:




- Diámetro del núcleo: 8.2 μm
- Diámetro del revestimiento: $125 \pm 0.7 \mu\text{m}$
- Apertura numérica: 0.14
- Índice de refracción efectivo: 1.4677 a 1310 nm y 1.4682 a 1550 nm

4.3. Propuesta de metodología de fabricación y caracterización

Para la fabricación de las rejillas se propone una metodología de fabricación *in situ*, es decir que mientras se fabrica la RPL se va monitoreando su respuesta, y así se observan las variaciones del espectro durante el proceso de grabación. Esto facilita su fabricación ya que se monitorea el comportamiento de la rejilla durante la fabricación.

Tabla 2. Material y equipo utilizado

Nombre	Imagen
Conectores FC	 Two FC connectors, one with a blue ferrule and one with a silver ferrule, both with a threaded body and a locking mechanism.
Pinzas para pelar fibra óptica	 A pair of fiber stripping pliers with black handles and a metal head.
Cortadora de fibra óptica	 A black fiber optic cutter with a handle and a cutting mechanism.

Sujetadores de fibra óptica	
Fuente de luz de gran ancho espectral	
Analizador de espectros óptico	

En el laboratorio se cuenta con el equipo necesario para realizar este tipo de metodología, el diagrama de conexiones se muestra a continuación:

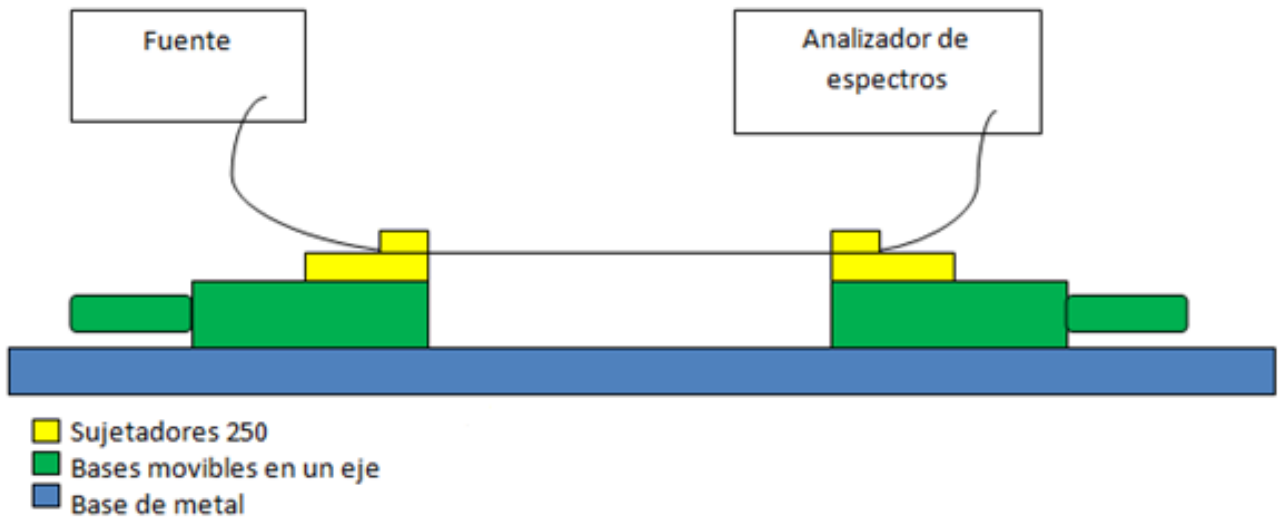


Figura 27. Diagrama de conexiones de la metodología propuesta.

El procedimiento de la fabricación de las rejillas se realiza en los siguientes sencillos pasos:

- Se corta un trozo de fibra óptica SMF-28 con cubierta de plástico de una longitud de un metro y medio, esta longitud es la adecuada para conectar la fuente y el analizador de espectros pasando por la base móvil del láser. Cabe mencionar que esta longitud puede variar dependiendo de la posición en donde se encuentre el equipo utilizado.

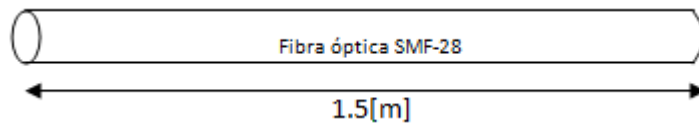


Figura 28. Trozo de fibra óptica

- Una vez que se tiene el trozo de fibra, se le quita la cubierta de plástico de los extremos, calculando que en estas zonas la fibra quede descubierta aproximadamente 2[cm], esto se realiza con ayuda de las pinzas.

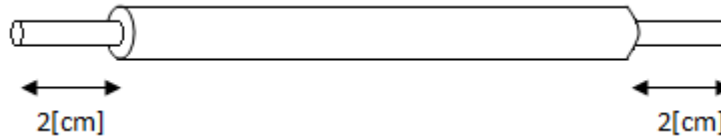


Figura 29. Trozo de fibra óptica sin cubierta de plástico en los extremos.

- Ya que se tienen los extremos descubiertos se hace un corte en cada uno de ellos, para que no haya imperfecciones en esta a la hora de conectarla a la fuente y al OSA, evitando pérdidas adicionales por esto. La distancia que debe quedar de fibra descubierta es aproximadamente 1.2 cm, es la adecuada para que se puedan insertar los conectores.

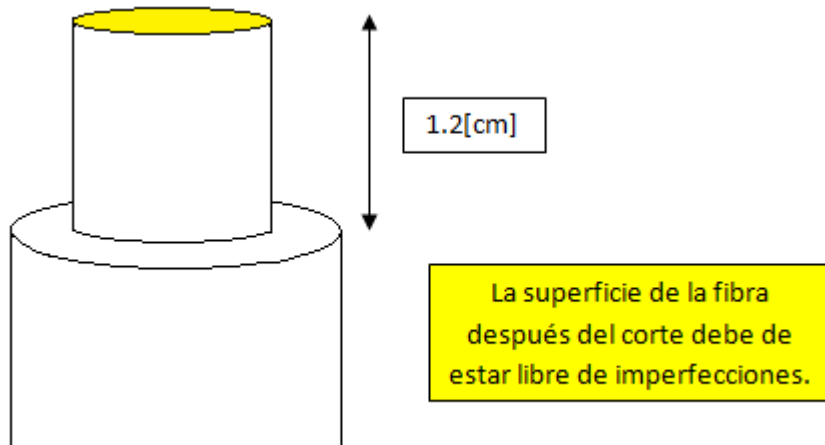


Figura 30. Extremo de la fibra después del corte.

- En los extremos se insertan los conectores FC, es por eso que se deja un trozo de fibra descubierta de una longitud arriba de un centímetro para que se puedan poner los conectores, ya que los conectores están diseñados para que entre la fibra pero sólo la parte de la cubierta y el núcleo.
- Se conecta la fuente con el analizador de espectros usando este trozo de fibra con conectores y se observa que en el analizador de espectros óptico (OSA) se esté recibiendo la señal correctamente. Se deben de observar los lóbulos a las longitudes de onda a las cuales trabaje la fuente.

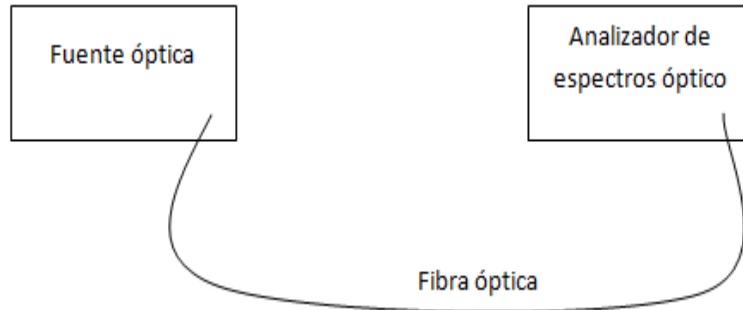


Figura 31. Conexión entre la fuente y el OSA.

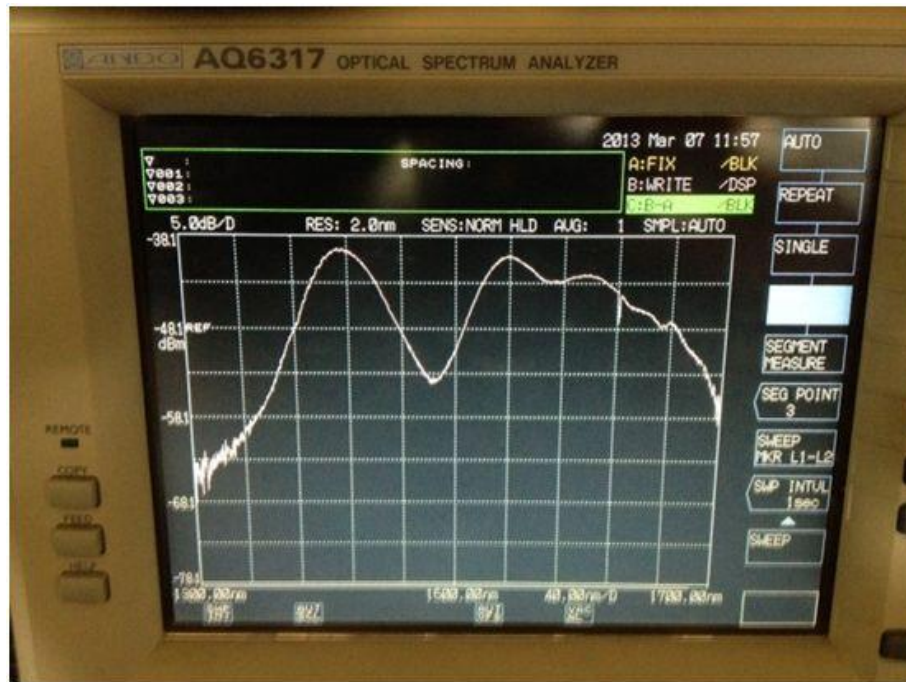


Figura 32. Espectro de la señal que envía la fuente.

- Se observa cómo es que se va a montar la fibra en la base móvil del láser, agarrada con los sujetadores 250 y en la parte en donde se le tiraron los pulsos con el láser se debe quitar la capa de plástico con ayuda de las pinzas, sólo en esta parte ya que la cubierta de plástico tiene que estar en donde se va a agarrar con los sujetadores 250 ya que es de gran ayuda para que la fibra no se resbale de estos y se pueda tensar y destensar.
- Ya que se dejó descubierta la parte en donde se tiraron los pulsos, ahora sí se monta sobre el láser y se deja bien tensada, preparada para que el láser comience su trabajo.

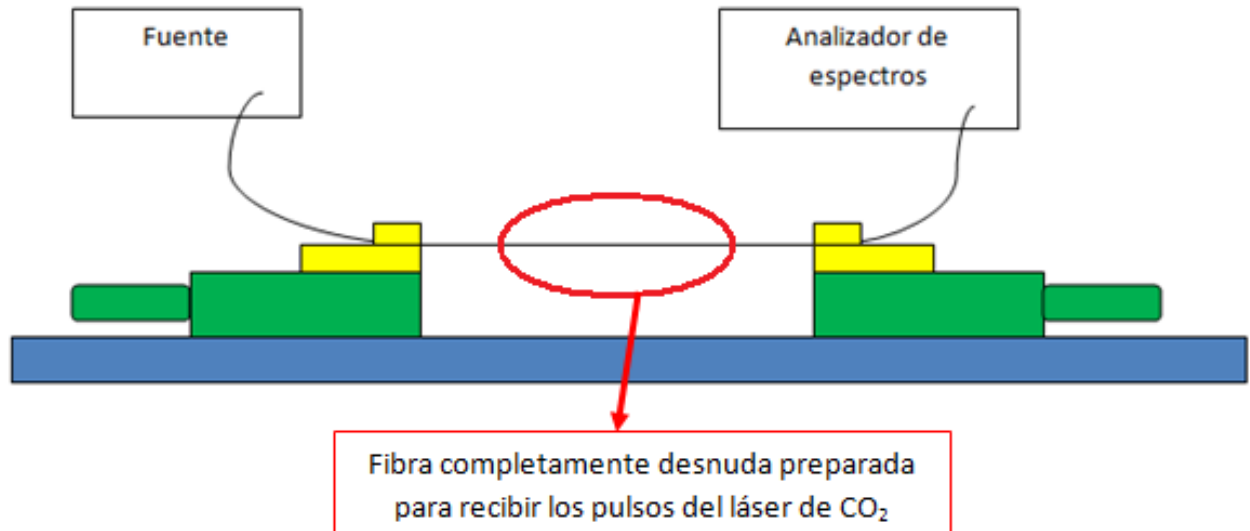


Figura 33. Fibra lista para recibir el lanzamiento de pulsos con el láser de CO₂.

- Es aquí en donde comienza el trabajo de la computadora y el software requerido, el primer programa que se utiliza es el PILANCE230, este es el que sirve para mover la base del láser en donde se montó la fibra. Hay que definir la casa, es decir, desde donde va a comenzar el láser a lanzar los pulsos. En el escritorio de la computadora se encuentra un ícono con este programa, se abre y en la primera ventana que aparece se selecciona COM2 y se le pone START. Cabe mencionar que para esto debe de estar prendido el eliminador de la base.
- Una vez que se hace esto el programa despliega otra ventana que es la encargada de mover la base. Se debe definir la casa tomando en cuenta que la base se mueve de izquierda a derecha, por lo que la casa se debe definir lo más pegada a la derecha de la zona de la fibra desnuda. Esto se hace con los botones de movimiento del programa, y una vez que ya llegamos a donde se quiere la casa se define con el botón 1DH o Define Home.
- Ya que se definió la casa, se cierran estas ventanas y se pasa a trabajar con MATLAB, para lo cual se abre este y una vez dentro de él se abre el programa ya hecho que dice "láser_prac.m".
- Haciendo esto, se va a desplegar la ventana de comandos con el programa, cuando se corre este programa lo que hace es desplegar una ventana en donde se ingresan los parámetros de la rejilla, cada uno con sus respectivas unidades.

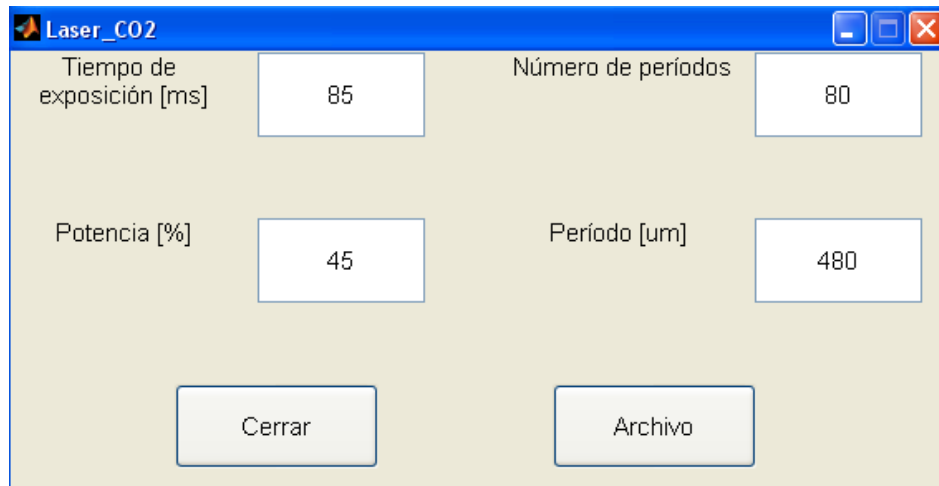


Figura 34. Ventana para ingresar los parámetros de la rejilla.

- Una vez que ya se pusieron los datos deseados se le da en la opción archivo, con lo que se genera un documento de texto (.txt), en donde hay tres columnas: periodo, potencia y tiempo de exposición. No es necesario ver este archivo, al oprimir la opción archivo de esta ventana automáticamente se genera y en este archivo estarán listos los valores para el láser.
- El archivo ya está generado lo que sigue es indicarle al láser que comience su trabajo con los datos de este archivo para lo cual se utiliza LABVIEW. Se abre este programa y cuenta con 4 pestañas, se oprime en la flecha hacia debajo de la que se llama OPEN y se selecciona un archivo que ya está creado que se llama "LáserAlf.VI".
- Dentro de LABVIEW este archivo ya está diseñado para mandar llamar el archivo de texto creado y hacer trabajar al láser con estos datos. Al seleccionar este archivo se despliega otra ventana, la cual cuenta con dos botones importantes: PLAY que es el encargado de comenzar el trabajo y STOP que es para parar dicho trabajo.

Notas importantes:

- Una vez que se define la casa es con la que siempre va a comenzar el programa de LABVIEW, es decir cada que se ponga PLAY en este programa se va a regresar al mismo punto en donde está definida para volver a comenzar.
- El láser cuenta con una llave de seguridad, que sirve para activar o desactivar el lanzamiento de los pulsos. Cuando ya está todo listo, esta debe de estar en posición vertical y el led verde prendido, y por seguridad una vez que no se van a tirar pulsos se debe poner en posición horizontal que indica que el láser esta desactivado.
- El programa de LABVIEW no va a comenzar a trabajar, a lanzar los pulsos si se encuentra abierto el programa de PILANCE230, es por eso que una vez que se deja de usar este último se debe de cerrar.
- En el programa de MATLAB también se van a generar pulsos con cero potencia, que son para darle estabilidad al movimiento de la base. Esto es, cuando se le da comenzar a LABVIEW

para tirar los pulsos, se tiene un determinado tiempo (4 segundos) para que la base regrese a la casa definida, una vez que llegó tira el primer pulso con la potencia definida y cuando lo termina tira un pulso sin potencia, esto antes de que se mueva la distancia del periodo definido para tirar el otro, se mueve el periodo definido y tira otro pulso sin potencia, esto para no tirar el pulso con potencia mientras hay un mínimo movimiento, ya que tira el pulso sin potencia ahora si lanza el pulso con la potencia definida, tira otro pulso sin potencia antes de moverse, y así sucesivamente.

En resumen, lo que se hace es conectar la fibra a la fuente y al analizador de espectros directamente con cada extremo de esta, para lo cual se utilizan los conectores. En el analizador se verifica que en verdad esté llegando la señal que se está enviando por dicha fibra, es decir que se estén enviando los pulsos a las longitudes de onda que trabaja la fuente, se debe de observar algo como en la figura 35 en la pantalla del analizador de espectros:

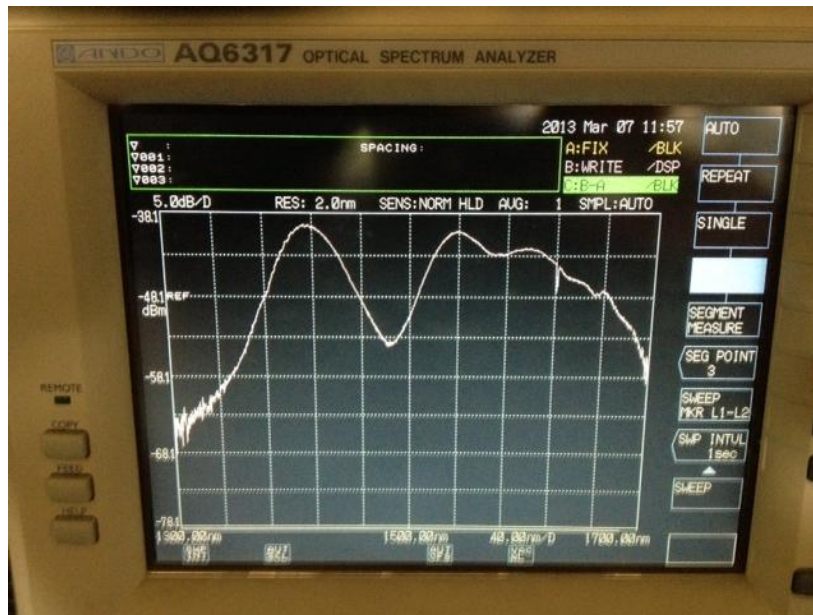


Figura 35. Respuesta de la fuente en el analizador de espectros.

Una vez que se tiene esto, se monta la fibra sobre la base del láser, sin desconectar ninguno de los dos aparatos antes mencionados. En la parte donde se tirarán los pulsos, la fibra debe de estar completamente desnuda, es decir sin la cubierta de plástico con la que se cuenta, de hecho dicha cubierta de plástico solo nos sirve para que a la hora de tensar la fibra no resbale de los sujetadores 250, con esta cubierta de plástico los sujetadores 250 retienen bien la fibra sin que ésta sea desplazada a la hora de ejercer una fuerza sobre esta para tensarla.

Después se verifica que la señal sea la misma aun cuando hemos puesto la fibra para tirarle los pulsos, si es que sigue la señal empezamos a poner los parámetros en la computadora y le comenzamos a tirar los pulsos. Es aquí en donde mientras tiramos los pulsos vemos que es lo que está pasando con la respuesta. Si los parámetros son los adecuados se tienen que empezar a formar lóbulos como se muestra a continuación:

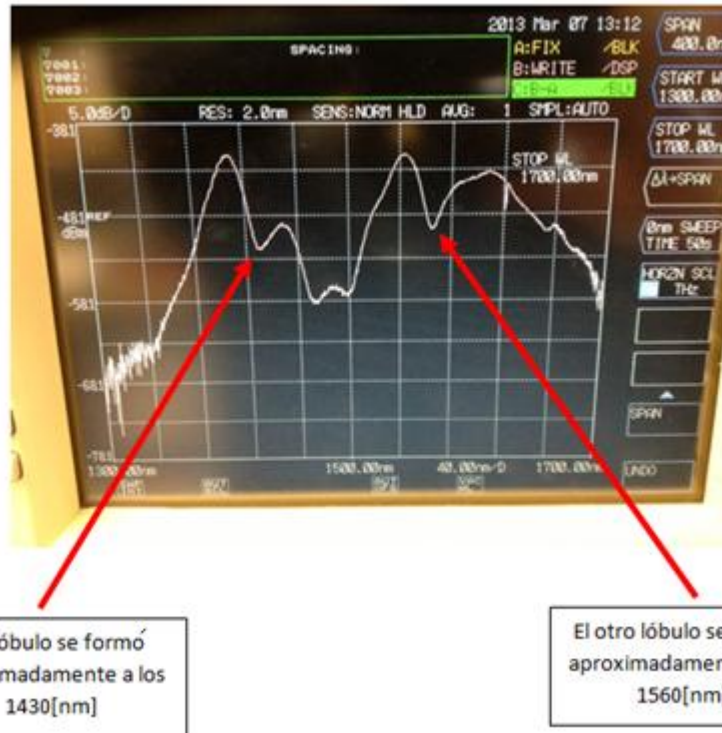


Figura 36. Espectro con los lóbulos que se comienzan a formar cuando se tiran los pulsos.

Es una metodología muy completa ya que se ahorra material y tiempo, pues si no están saliendo los resultados deseados se cancela la fabricación y se observa porque no está saliendo lo que se pretende, además de que se observa que es lo que pasa cuando se cambian los parámetros en la computadora.

Para el caso de las rejillas no uniformes (solo con variaciones de fase) lo único que se hace es fabricar una rejilla uniforme, como se ha explicado anteriormente, y desplazarse la mitad del periodo para después fabricar otra con las mismas características que la primera. Realmente se tendrán dos rejillas en la misma fibra separadas una distancia igual a la mitad del periodo.



Figura 37. Rejilla no uniforme.

En donde:

$$\Lambda = 2\pi$$

Lo anterior representa un cambio de fase de 180° para la mitad del periodo.

Este desplazamiento se hace para obtener dos picos de atenuación prácticamente juntos centrados a la longitud de onda central deseada. Esto se hace de la siguiente manera:

- Ya que se tiene la primera rejilla fabricada se vuelve a definir la casa en donde termina la fabricación de esta.
- En la ventana que despliega Matlab para ingresar los parámetros se le pone un periodo de la mitad del periodo de la rejilla, número de periodos igual a uno, potencia igual a cero y tiempo de exposición igual a cero.
- Una vez que termina de trabajar el láser se vuelve a definir la casa.
- Y se fabrica la segunda rejilla con los mismos valores que la primera.

4.4. Pruebas realizadas en el IIM

La fabricación y caracterización se llevo a cabo en el Laboratorio de Comunicaciones Ópticas del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la División de Ingeniería Eléctrica (DIT-DIE) de la UNAM, y para comprobar que los resultados son correctos también se acudió a hacer pruebas al Laboratorio de Fibra Óptica del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM que tiene como encargado al Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero.

Para realizar estas pruebas con las rejillas de periodo largo que ya teníamos fabricadas se hicieron las conexiones de la figura 38.

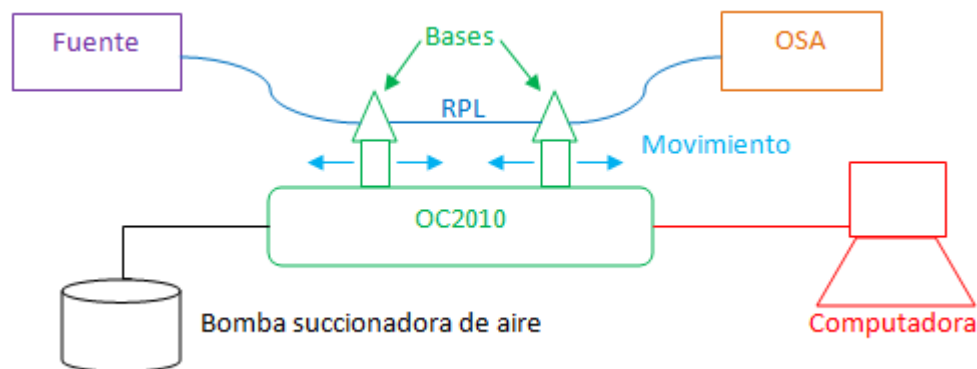


Figura 38. Diagrama de conexiones empleado en el IIM.

Lo que se hizo en este laboratorio una vez que ya se llevaba la RPL fabricada fue conectarla a la fuente y al analizador de espectros óptico, y verificar que llega la señal. Con ayuda del aparato OC2010 de la marca Dowson, que es una estación para fabricar acopladores por fusión, sujetamos la fibra para aplicar tensión en la zona donde está fabricada la RPL, esto se hace colocando la fibra en las bases que presenta el OC2010, procurando que quede bien tensa la parte de la RPL, se prende la bomba succionadora de aire y lo que hace es dejar fija está fibra en dichas bases, se atornillan dichas bases para apretar la fibra e inmovilizarla y así poder apagar la bomba succionadora de aire.

Así como quede la fibra óptica será la posición inicial y con ayuda de la computadora se dará movimiento a las bases ya sea separándolas o juntándolas ciertas cantidades de longitud precisas según lo deseado.

5. Resultados del experimento

5.1. Pruebas de las RPL como sensor de cantidades físicas

Se fabricaron diversas muestras de RPL con las mismas características para conocer la repetitividad de la metodología de fabricación. A continuación se muestran los resultados principales del proceso de fabricación, así como su comportamiento como sensor de tensión de una RPL uniforme significativa, es decir que presento óptimos resultados.

Las características de la rejilla de periodo largo son las siguientes:

Tabla 3. Características de la RPL.

Parámetro	Valor
Periodo	480 [um]
Longitud de la rejilla	19.2 [mm]
Número de periodos	40
Potencia real	22.5 %
Tiempo de exposición	85[ms]

El espectro obtenido, medido justo después del último periodo de fabricación de la rejilla es considerado como el espectro original de la RPL fabricada.

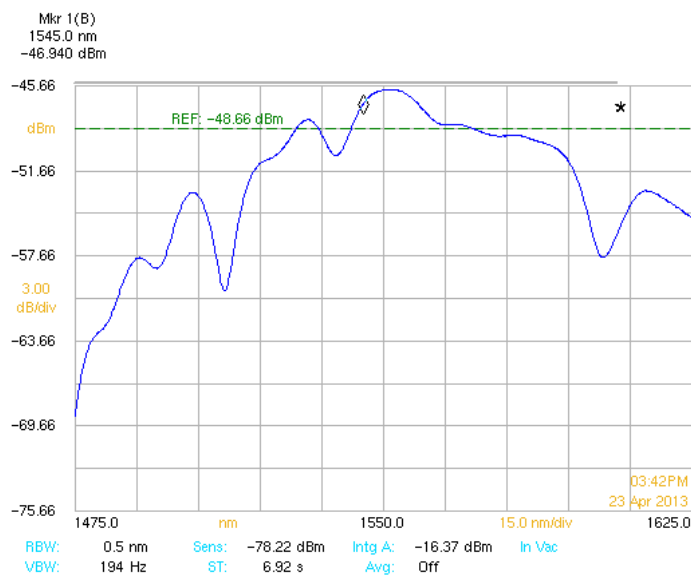


Figura 39. Espectro de la RPL (espectro original).

Es posible observar 4 picos de atenuación en las siguientes longitudes de onda: ~1497 nm, ~1512 nm, ~1538 nm y ~1600 nm.

La caracterización se hizo primero en el Laboratorio de Comunicaciones Ópticas del DIT-DIE y después se utilizó el equipo que pertenece al IIM, específicamente al grupo de trabajo del Dr. Cordero, obteniendo los mismos resultados. Se optó por colocar las imágenes de la segunda caracterización por la calidad de las mismas.

Para conocer la respuesta de la RPL a las variaciones de tensión, se utilizó un equipo capaz de cuantificar el desplazamiento o estiramiento de la fibra óptica. El siguiente espectro es para una variación en la distancia de 320 μm :

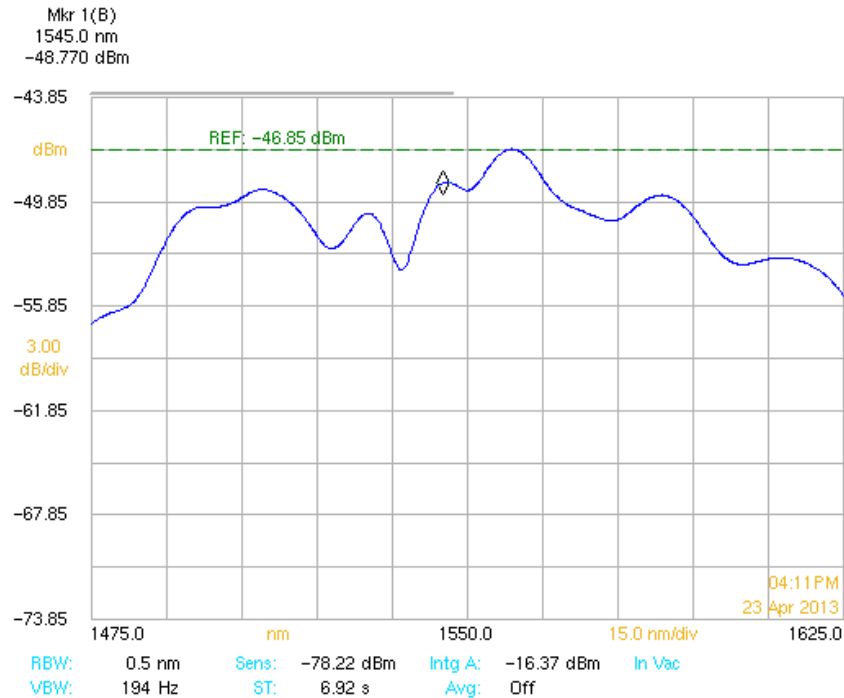


Figura 40. Espectro de la rejilla de periodo largo con una separación para tensarla de 320[μm].

Comparado con el espectro original (figura 39) observamos que se forman dos picos juntos aproximadamente en 1535[nm]. El pico que estaba en ~ 1600 [nm] parece que disminuye, pero en realidad se desplazó a la izquierda y en su posición original se comienza a formar otro.

La siguiente variación de la distancia que sigue es de 560[μm]:

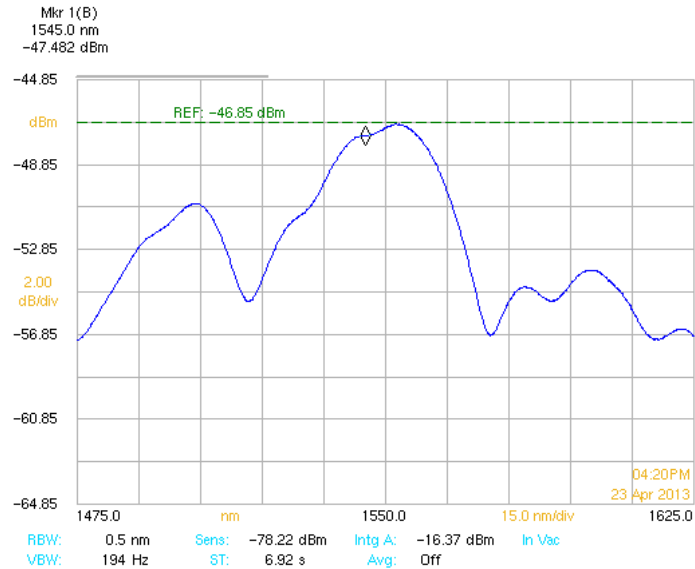


Figura 41. Espectro de la rejilla de periodo largo con una separación para tensarla de 560[μm].

Observamos que los dos picos que comenzaban a formarse en 1535[nm] aproximadamente se empiezan a hacer uno solo y se recorre a la izquierda, a ~ 1517 [nm], además de que se hace más profundo. Adicionalmente se vuelven a formar dos picos juntos pero ahora a ~ 1580 [nm], es decir los que se empezaron a formar con la separación de 320[μm], ahora se juntan mas y se hacen más profundos, en otras palabras el pico que se encontraba a ~ 1600 [nm] se comienza a ir hacia la izquierda. Sin dejar a un lado que aparece uno muy pequeño a 1615[nm] aproximadamente.

Ahora se hace una variación de 900[μm] en la distancia de separación:

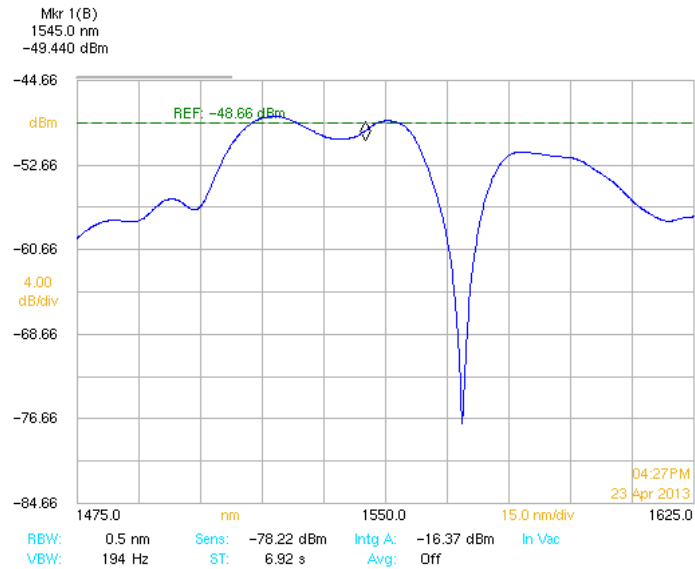


Figura 42. Espectro de la rejilla de periodo largo con una separación para tensarla de 900[μ m].

Como se observa, la principal y más notable diferencia es que los dos picos que se encontraban a ~ 1580 [nm], se convierten en uno muy profundo a 1570[nm] aproximadamente, es decir hay una tendencia de movimiento de el espectro hacia la izquierda. Del otro lado el pico que se formaba a ~ 1517 [nm] se hace más pequeño, y se recorre a la izquierda a ~ 1505 [nm]. En realidad en esta figura 42 se muestra un buen comportamiento de la rejilla de periodo largo con ese profundo pico de atenuación.

El espectro que sigue fue el resultado para una variación en la distancia de 1300[μ m]:

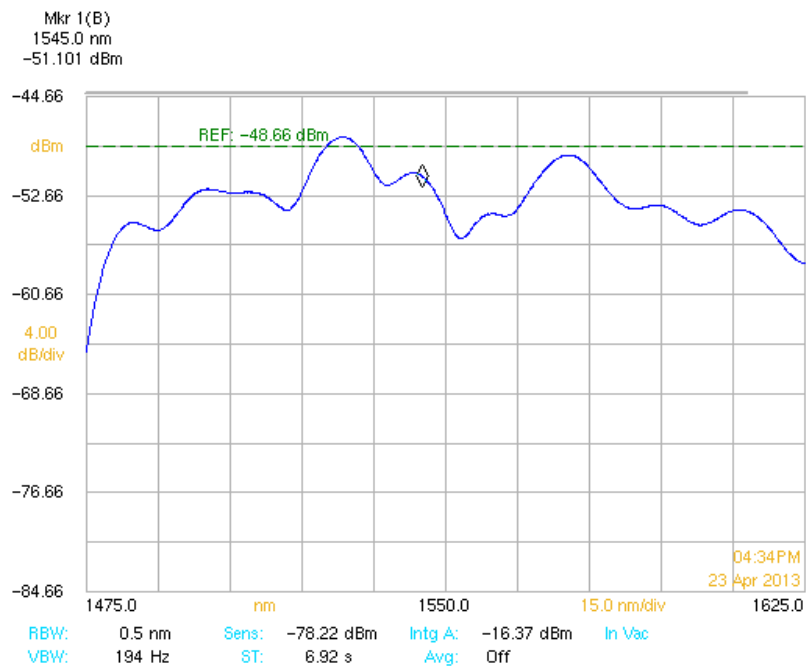


Figura 43. Espectro de la rejilla de periodo largo con una separación para tensarla de 1300[μ m].

Con esta tensión ya se observa que el pico profundo que aparecía en la figura anterior se hizo pequeño pero una vez más se recorre hacia la izquierda, pues ahora aparece en 1553[nm] aproximadamente. El pico de la izquierda que aparecía a ~ 1505 [nm] ahora aparece en 1490[nm]. Con lo que se comprueba el movimiento hacia la izquierda de los picos del espectro original.

En realidad lo que se hizo fue ir variando en muy pequeñas cantidades, centenas o decenas de micrómetros, esta distancia de separación para tensar la fibra, por lo que se obtuvieron 32 gráficas, de las cuales se comparan las significativas. La anterior comparación fue para distancias “grandes” centenas de micrómetros, lo que sigue es una comparación de la misma rejilla de periodo largo pero ahora con incrementos en la separación para tensar más pequeños, decenas de micrómetros.

Ahora comenzamos mostrando el espectro para una variación en la distancia de 280[μm]:

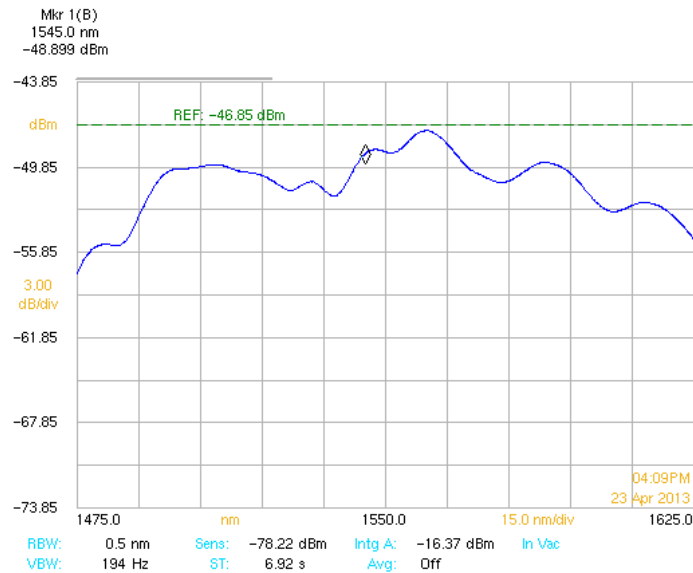


Figura 44. Espectro de la rejilla de periodo largo con una separación para tensarla de 280[μm].

Con respecto al espectro original (Figura 39) observamos que el pico que se encuentra a ~ 1600 [nm] se hizo más pequeño y se comienza a formar uno a 1580 aproximadamente, además de que se forman dos picos con una longitud de onda central entre ellos de ~ 1535 [nm].

Como ya se mencionó ahora se variará la distancia en cantidades más pequeñas para ver el comportamiento de dicha rejilla. Por lo que esta separación pasa a ser de 320[μm]:

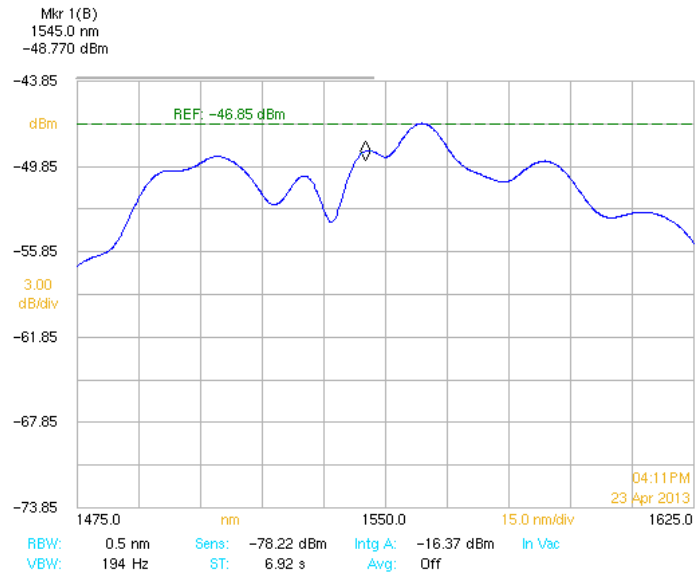


Figura 45. Espectro de la rejilla de periodo largo con una separación para tensarla de 320[μm].

Ahora lo que observamos es que los dos picos que se formaban en ~ 1535 [nm] se hacen más profundos y también se desplazan hacia la izquierda pues ahora su longitud de onda central es ~ 1530 . Con respecto a los picos del lado derecho de la gráfica casi no hay diferencias existe un pequeño desplazamiento a la izquierda pero no es notable.

La separación ahora pasa a 360[μm]:

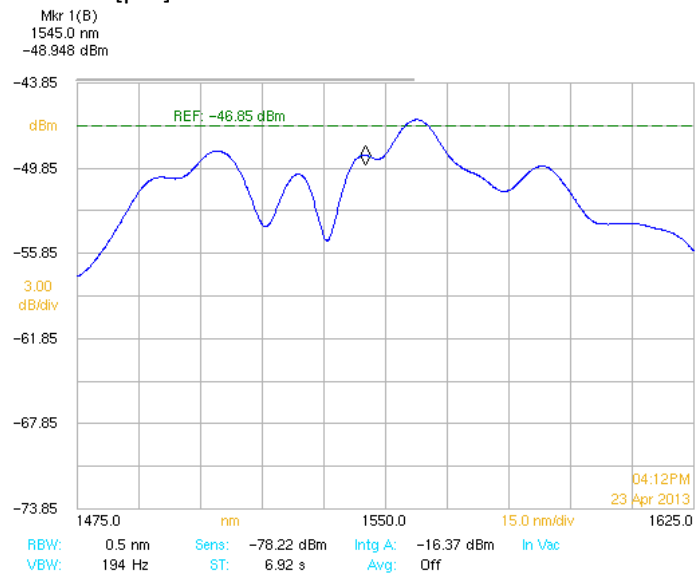


Figura 46. Espectro de la rejilla de periodo largo con una separación para tensarla de 360[μm].

Las diferencias que se presentan en esta gráfica son que los dos picos que tenían la longitud de onda central ~ 1530 [nm] se recorren ligeramente hacia la izquierda, ahora la longitud de onda central

aparece en ~ 1528 [nm], además de que se hacen más profundos. Los picos que se encuentran a la derecha de la gráfica siguen con la misma profundidad pero se siguen desplazando hacia la izquierda.

Y por último se hará el análisis de una separación de 400 [μm]:

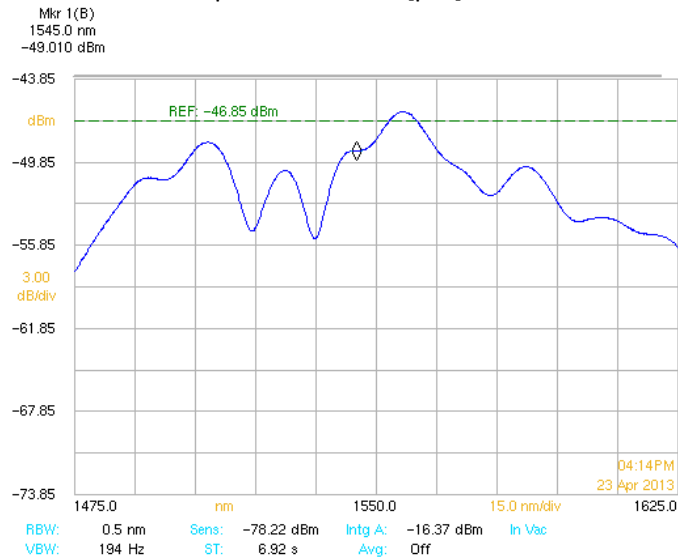


Figura 47. Espectro de la rejilla de periodo largo con una separación para tensarla de 400 [μm].

Ahora la longitud de onda central de los dos picos pasa de ~ 1528 [nm] a ~ 1525 [nm], asimismo igualan e incrementan su profundidad. Los dos picos que se encuentran a la derecha de la gráfica se siguen recorriendo muy poco a la izquierda, ya que si observamos el pico que en la figura 46 tiene una longitud de onda ~ 1580 [nm] pasa a estar en 1577 [nm] aproximadamente.

Cabe mencionar que estos resultados se comprobaron en el Instituto de materiales, concluyendo que salió lo mismo con respecto a lo obtenido en el laboratorio de óptica. Esto debido a que en dicho Instituto se cuenta con material y equipo más actual, pero no hubo diferencias notables. La única diferencia importante que podemos resaltar es que en el Instituto pudimos cuantificar la separación que se le daba a la fibra para tensarla y destensarla con equipo y software especializado. Además de que el OSA con el que cuentan en ese Instituto es muy novedoso, manda las gráficas a una computadora como imágenes.

5.2. Verificación de la viabilidad de medición de cambios de los parámetros físicos

Para hacer énfasis en la comprobación de la aplicación de las rejillas de periodo largo como sensores del parámetro físico tensión, se hace una comparación de las gráficas del apartado anterior en [dB] para observar el comportamiento como tal de la rejilla con las pérdidas que esta introduce, todo esto para observar los cambios que sufre el espectro al tensar la fibra.

Una vez más primero se hará la comparación para los cambios “grandes” de la distancia para tensar la fibra, es decir a 320[μm], 560[μm], 900[μm] y 1300[μm] (figuras 40-43).

Se hará la comparación en [dB] para observar el comportamiento real de la rejilla, ya que en este caso lo que se hace es una resta del espectro que arroja el OSA menos el espectro original, lo que da como resultado el comportamiento que en realidad tiene la rejilla de periodo largo fabricada.

Al comparar las cuatro gráficas totales en [dB] se tiene lo siguiente:

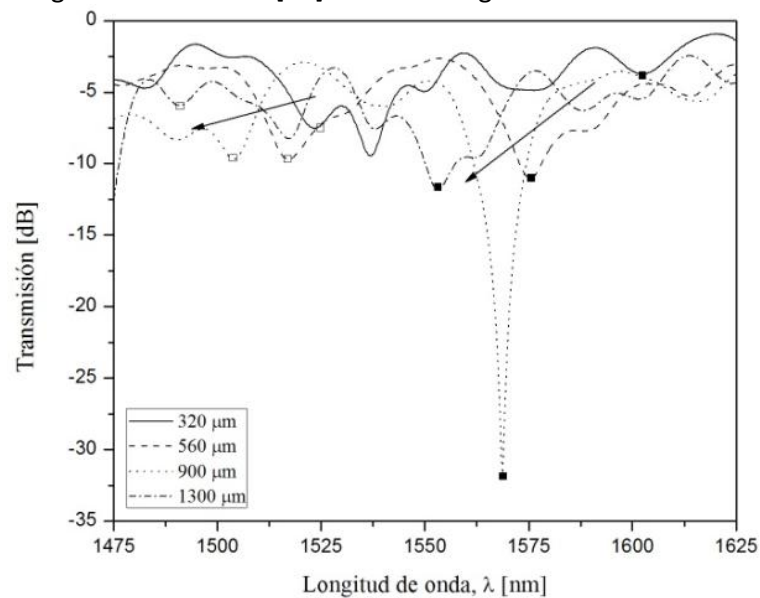


Figura 48. Comparación de los resultados al ir tensando la RPL con distancias “grandes”.

Ahora es más claro el comportamiento de la rejilla y su desplazamiento hacia la izquierda mientras la fibra se tensa más, los dos picos en seguimiento sufren este desplazamiento, lo que verifica su aplicación como sensor.

Se hará un enfoque en ambos lados de la gráfica para verificar el desplazamiento de los picos hacia la izquierda ya mencionado.

El acercamiento del lado izquierdo se observa de la siguiente manera:

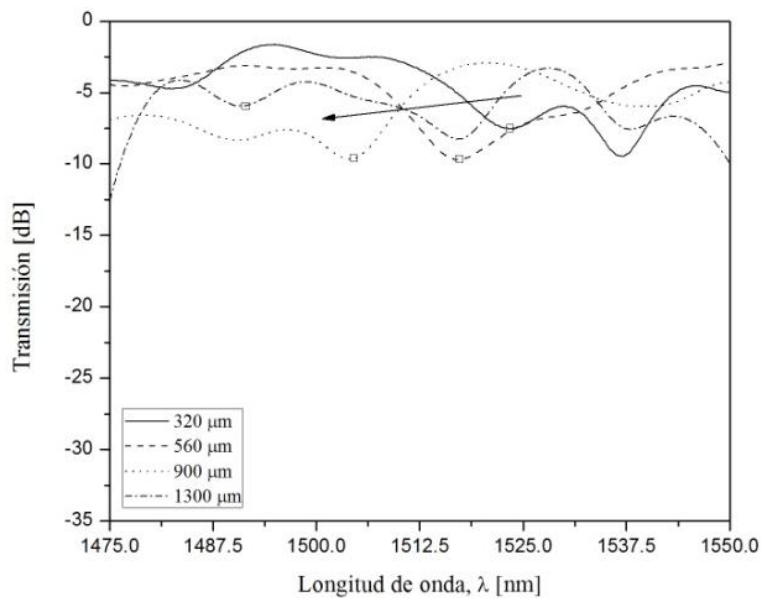


Figura 49. Comparación de los resultados al ir tensando la RPL con distancias “grandes”, enfocando el lado izquierdo.

Se observan pequeños círculos sin relleno que dan seguimiento al desplazamiento hacia la izquierda del pico, como la flecha lo indica.

La aproximación del lado derecho se observa de la siguiente manera:

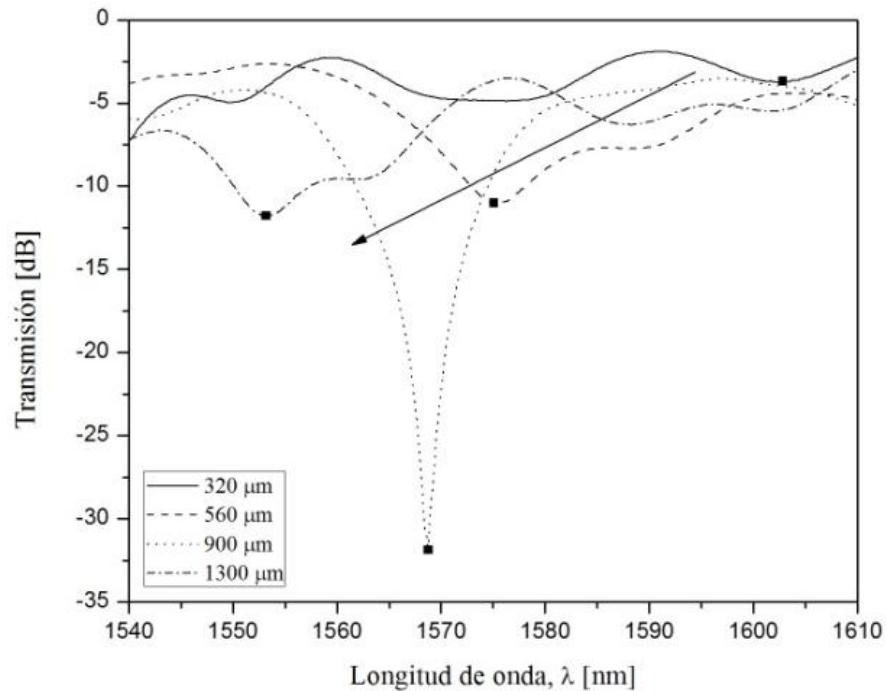


Figura 50. Comparación de los resultados al ir tensando la RPL con distancias “grandes”, enfocando el lado derecho.

Seguimos observando el comportamiento de este pico con desplazamiento hacia el lado izquierdo (disminuyendo la longitud de onda de resonancia mientras se aumenta la tensión), pero aquí es de importancia la profundidad que llega a alcanzar.

Ahora se harán las comparaciones de las gráficas de la rejilla pero con distancias pequeñas para tensar la fibra, esto es 280[μm], 320[μm], 360[μm] y 400[μm] (figuras 44-47).

Esta comparación se hace, como ya se mencionó, para observar el comportamiento real de la rejilla de periodo largo. De forma total se observa lo siguiente:

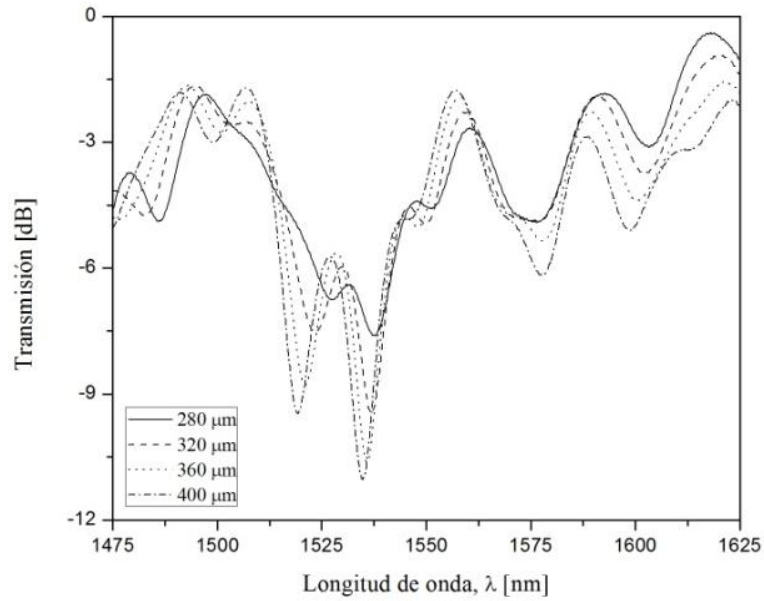


Figura 51. Comparación de los resultados al ir tensando la RPL con distancias pequeñas.

La rejilla como tal tiene el desplazamiento ya mencionado hacia la izquierda y el aumento en la profundidad de sus picos.

El acercamiento del lado izquierdo se observa de la siguiente forma:

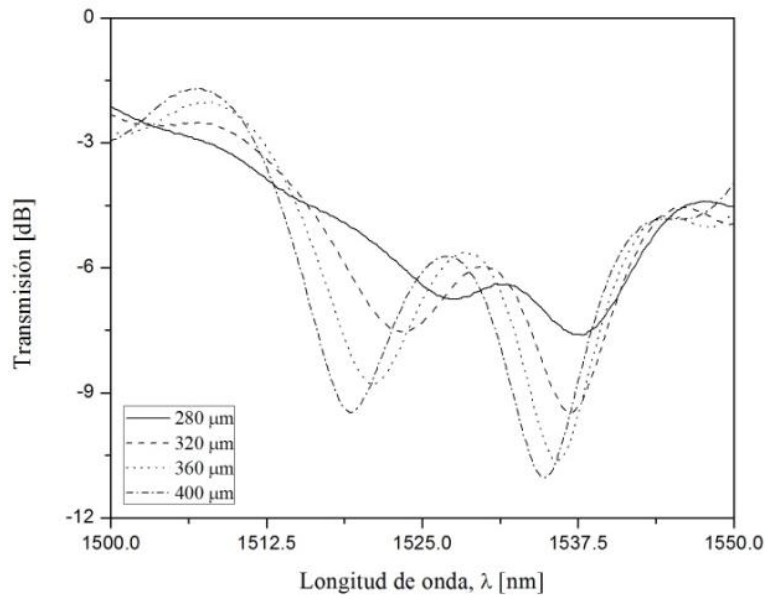


Figura 52. Comparación de los resultados al ir tensando la RPL con distancias pequeñas, enfocando el lado izquierdo.

Haciendo una aproximación del lado derecho se observa lo siguiente:

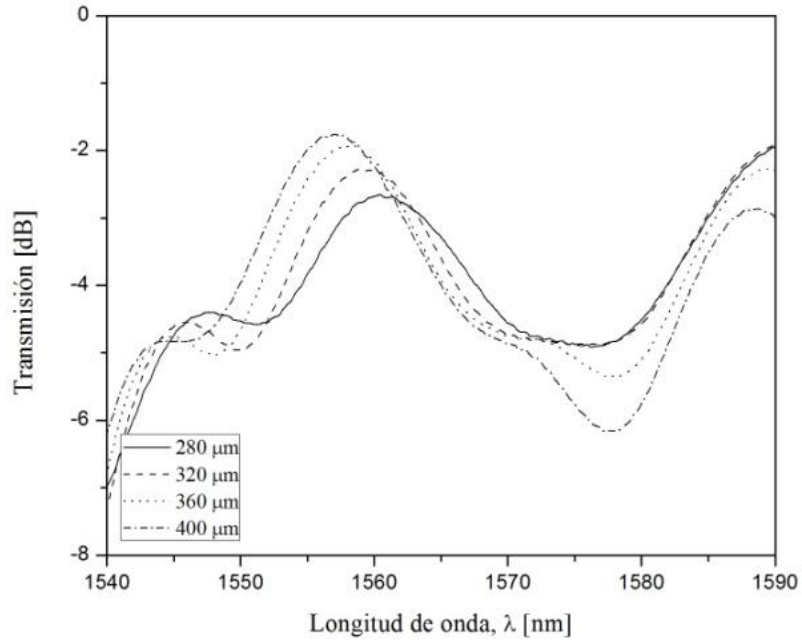


Figura 53. Comparación de los resultados al ir tensando la RPL con distancias pequeñas, enfocando el lado derecho.

Se observa mejor el comportamiento de la rejilla en los picos del lado izquierdo de las gráficas, ya que sí aumentan notablemente su profundidad y es un desplazamiento hacia la izquierda sobresaliente.

En general lo que se observa en este apartado es que mientras se va tensando la fibra la longitud de onda de resonancia de los picos de la rejilla de periodo largo va disminuyendo (desplazamiento a la izquierda), lo que verifica la aplicación de la rejilla de periodo largo como un sensor de tensión.

5.3. Rejillas de Periodo Largo no uniformes

Para conocer la variación espectral de una rejilla no uniforme, se realizó la fabricación de una RPL con las características mostradas en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros experimentales de la rejilla no uniforme.

Parámetro	Valor
Periodo	480[μm]
Longitud total de la rejilla	38.64[mm]
Número de periodos sección 1	40
Número de periodos sección 2	40
Tiempo de exposición	100[ms]
Potencia real	25[%]
Fase entre secciones	π

Se obtuvo un espectro en donde se formaron dos picos alrededor de 1605 nm, con clara profundidad, pero los dos con la misma.

Al tensar la fibra los picos incrementan su profundidad, la siguiente figura muestra el espectro que se formó y las variaciones que presenta al tensar la fibra:

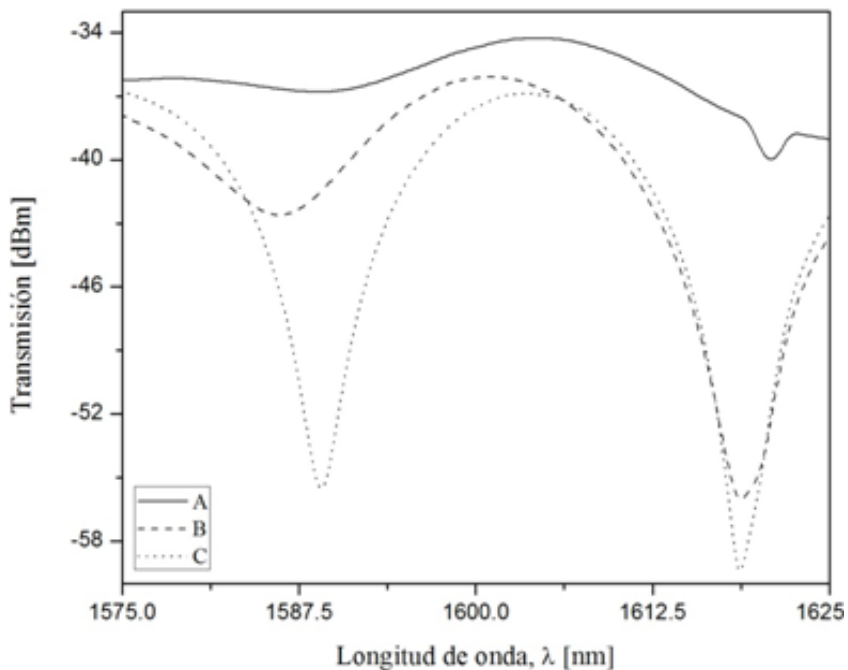


Figura 54. Espectro de la rejilla no uniforme al ir variando la tensión.

5.4. Comparación de resultados teóricos y experimentales

Se realizó la comparación entre los resultados teóricos [29] con las RPL fabricadas. La rejilla uniforme se simuló de manera teórica con las características de la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros teóricos de la rejilla no uniforme.

Parámetro	Valor
Periodo	480[μ m]
Longitud	38.64[mm]
Número de periodos	82
Coefficiente de acoplamiento	0.25

En la figura 55 se observa el comportamiento de la RPL simulada de forma teórica. Y el resultado obtenido es el siguiente:

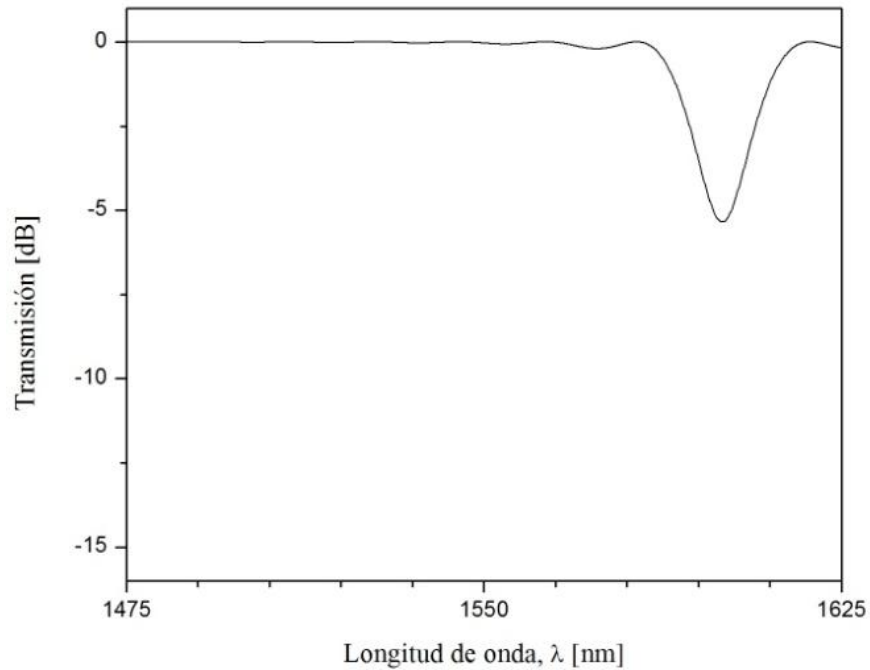


Figura 55. Simulación teórica de una RPL uniforme.

Si comparamos este resultado con la Figura 39 observamos que también se generó un pico de atenuación alrededor de 1600 nm.

En cuanto a la rejilla no uniforme se simuló teóricamente con las siguientes características:

Tabla 6. Parámetros teóricos de la rejilla no uniforme.

Parámetro	Valor
Periodo	480 μm
Longitud total de la rejilla	39.6 mm
Número de periodos sección 1	41
Número de periodos sección 2	41
Coefficiente de acoplamiento sección 1	0.25
Coefficiente de acoplamiento sección 2	0.50
Fase entre secciones	π

Y el resultado obtenido es el siguiente:

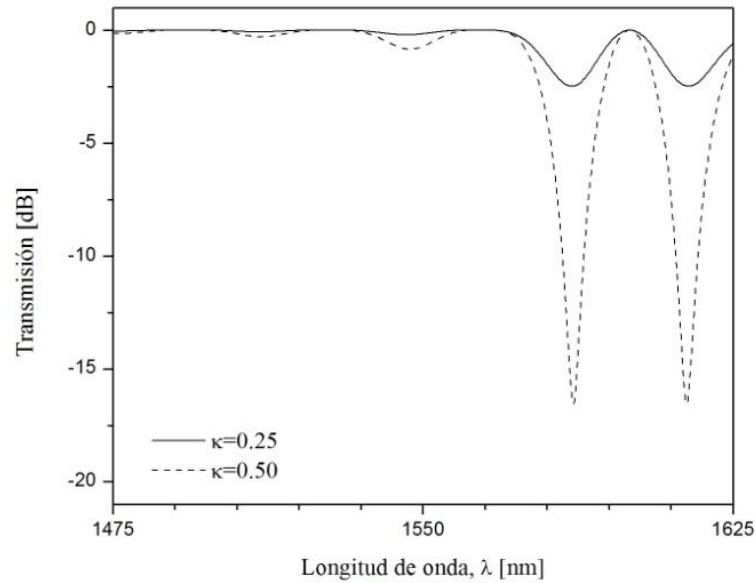


Figura 56. Simulación teórica de la rejilla no uniforme para dos coeficientes de acoplamiento.

Observamos que se hicieron dos simulaciones con diferente coeficiente de acoplamiento y en lo que varían es en la profundidad de la banda de atenuación. Si comparamos la Figura 56 con la Figura 54, se observa una gran similitud pues experimentalmente aparecieron estos dos picos con una longitud de onda central de 1605 nm; es muy parecida la respuesta teórica a la experimental.

Las diferencias entre el comportamiento teórico y experimental se deben a que los parámetros utilizados son diferentes.

Tabla 7. Comparación entre los parámetros teóricos con los parámetros experimentales.

Parámetro Teórico	Parámetro Experimental
Coefficiente de acoplamiento	Potencia del láser
Fase entre secciones	Tiempo de exposición del láser
Periodo	Periodo
Número de periodos	Número de periodos

Se observa que tanto el periodo como el número de periodos son características que se presentan en la parte teórica y experimental; por otro lado el coeficiente de acoplamiento y la fase entre secciones varían entre un modelo y el otro.

De manera experimental con la potencia y el tiempo de exposición podemos variar la profundidad del pico o los picos de atenuación que se forman, mientras que de manera teórica es necesario modificar el coeficiente de acoplamiento. En el caso de las rejillas no uniformes, de manera teórica, la fase entre secciones es la que determina el cambio del espectro.

6. Conclusiones

- El uso y aplicación de sensores basados en RPL han tenido gran aprobación ya que son elementos en línea, con lo cual se adquieren ventajas como un tamaño pequeño, ligeros, inmunes a interferencia electromagnética y de alta sensibilidad.
- La metodología propuesta para la fabricación de RPL mediante la técnica punto a punto, es muy práctica y confiable ya que permite obtener comportamientos espectrales complejos debido a la facilidad para fabricar rejillas de periodo largo no uniformes.
- La potencia del láser de dióxido de carbono y su efecto térmico producen modificaciones notables en la fibra óptica, lo que permite la fabricación de las rejillas.
- Se obtuvieron valores óptimos de: potencia, tiempo de exposición, periodo y número de periodos, para una fabricación confiable de diversas muestras de RPL.
- Se comprobó que existe un número determinado de periodos que permite obtener una profundidad máxima; al tener un número mayor de periodos el pico de atenuación empieza a desaparecer; el número de periodos óptimo fue de 40.

Se hicieron diversas rejillas de periodo largo con las cuales:

- Se comprobó que la metodología de fabricación es un proceso repetible, es decir que en las RPL fabricadas con los mismos parámetros de grabación se obtiene el mismo comportamiento espectral.
- Las RPL sirven como sensores de tensión debido a que el espectro de transmisión sufre cambios al momento de aplicar una tensión a la fibra óptica.
- Se comprendieron las diferencias teóricas y experimentales entre las rejillas uniformes y las no uniformes; en particular con cambio de fase. Esto se logró mediante la fabricación de las RPL y su análisis teórico.

En este trabajo de tesis se implementó una metodología para la fabricación de RPL que funcione de la mejor manera con buenas características de trabajo, se comprobó que en realidad funciona fabricando diversas rejillas de periodo largo, analizando su espectro para así encontrar su aplicación de sensor óptico de la tensión, cumpliendo con los objetivos.

7. Referencias

- [1] V. Bhatia, A.M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.* 21(9), 692-694(1996).
- [2] S.W. James, R. P. Tatam, "Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application", *Meas. Sci. Technol.* 14(5), 49-61(2003).
- [3] Y.P. Wang, D.N. Wang, W. Jin, "CO₂ laser-grooved long period fiber grating temperature sensor system based on intensity modulation," *Appl. Opt.* 45(31), 7966-7970(2006).
- [4] K. Hishiki, H. Li, "Phase-shift formed in a long period fiber grating and its application to the measurements of temperature and refractive index," *Opt. Exp.* 21(10), 11901-11912(2013).
- [5] A.M. Vengsarkar, J.R. Pedrazzani, J.B. Judkins, P.J. Lemaire, N.S. Bergano, C.R. Davidson, "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," *Opt. Lett.* 21(5), 336-339 (1996).
- [6] L. Drozin, P.-Y. Fonjallaz, L. Stensland, "Long-period fibre gratings written by CO₂ exposure of H₂-loaded, standard fibres," *Electron. Lett.* 36(8), 742-744(2000).
- [7] D.D. Davis, T.K. Gaylord, E.N. Glytsis, S.G. Kosinski, S.C. Mettler, A.M. Vengsarkar, "Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser pulses," *Electron. Lett.* 34(3), 302-303(1998).
- [8] A. Castillo-Guzmán, D. Ceballos, R. Selvas-Aguilar, C. Calles-Arriaga, I. Torres-Gomez, "Rejillas de Periodo Largo Grabadas en Fibras Ópticas Estándares con un Láser de CO₂", en XLX Congreso Nacional de Física SMF, y extenso arbitrado del XX Reunión Anual de la AMO, Veracruz, Ver., artículo OPTICA-2007, p 1-5, 2007.
- [9] G. Beltrán-Pérez, R. Agustín-Serrano, S. Muñoz-Aguirre, J. Castillo-Mixcóatl, "Fabricación y caracterización de rejillas de transmisión en fibras ópticas convencionales," en III encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia, CIO, León, México, 2006.
- [10] A. Othonos, K. Kally, *Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Artech House, 1999.
- [11] G. Keiser, *Optical communication essentials*, New York, McGraw-Hill, 2003.
- [12] J.P. Nérou, *Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas*, México, Trillas, 1991.
- [13] Z. Dong, X. Li, J. Yu, N. Chi, "6 128-Gb/s Nyquist-WDM PDM-16QAM Generation and Transmission Over 1200-km SMF-28 With SE of 7.47 b/s/Hz," *J. Lightw. Technol.* 30(24), 4000-4005(2012).
- [14] S.E. Miller, E.A.J. Marcatili, T. Li, "Research toward optical-fiber transmission systems," *Proc. IEEE* 61(12), 1703-1704(1973).
- [15] K.O. Hill, Y. Fujii, D.C. Johnson, B.S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.* 32(10), 647-649(1978).
- [16] A.D. Kersey, M.A. Davis, H.J. Patrick, M. LeBlanc, K.P. Koo, C.G. Askins, M.A. Putnam, E.J. Friebele, "Fiber Grating Sensors," *J. Lightw. Technol.* 15(8), 1442-1463(1997).
- [17] T. Erdogan, "Fiber Grating Spectra," *J. Lightw. Technol.* 15(8), 1277-1294(1997)

- [18] H. Ke, K.S. Chiang, J.H. Peng, "Analysis of Phase-Shifted Long-Period Fiber Gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 10(11), 1596-1598(1998).
- [19] Y.P. Wang, J.P. Chen, Y.J. Rao, "Torsion characteristics of long-period fiber gratings induced by high-frequency CO₂ laser pulses," *J. Opt. Soc. Am. B* 22(6), 1167-1172(2005).
- [20] Z. Yan, C. Mou, K. Zhou, X. Chen, L. Zhang, "UV-Inscription, Polarization-Dependant Loss Characteristics and Applications of 45° Tilted Fiber Gratings," *J. Lightw. Technol.* 29(18), 2715-2724(2011).
- [21] N.J. Alberto, C.A. Marques, J.L. Pinto, R.N. Nogueira, "Three-parameter optical fiber sensor based on a tilted fiber Bragg grating," *Appl. Opt.* 49(31), 6085-6091(2010).
- [22] W. Shin, B.A. Yu, Y.L. Lee, Y.C. Noh, D.K. Ko, J. Lee, "High strength coupling and low polarization-dependent long-period fiber gratings based on the helicoidal structure," *Opt. Fiber Technol.* 14(4), 323-327(2008).
- [23] G. Meltz, W.W. Morey, W.H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt. Lett.* 14(15), 823-825(1989).
- [24] K.O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D.C. Johnson, J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.* 62(10), 1035-1037(1993).
- [25] B. Malo, K.O. Hill, F. Bilodeau, D.C. Johnson, J. Albert, "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).
- [26] A. Malki, G. Humbert, Y. Ouerdane, A. Boukhenter, A. Boudrioua, "Investigation of the writing mechanism of electric-arc-induced long-period fiber gratings," *Appl. Opt.* 42(19), 3776-3779(2003).
- [27] C.K.N. Patel, "Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂," *Phys. Rev.* 136 (5A), A1187-A1193(1964).
- [28] Corning® SMF-28® ULL Optical Fiber With Corning® Ultra-Low Loss Technology, Product Information, PI1470, 2011.
- [29] Beltrán Hernández, Alfredo, "Modelado matemático de las rejillas en fibras ópticas". Tesis de Maestría, UNAM (2011).