



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**FABRICACION DE REJILLAS DE  
PERIODO LARGO EN FIBRA ÓPTICA  
CON UN LASER DE CO2**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

INGENIERÍA ELÉCTRICA - TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

**AMALIA NALLELY CASTRO MARTÍNEZ**

TUTOR:

**DR. SERGEI KHOTIAINTSEV**

2011





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Bruce Davidson Neil Charles

Secretario: Dr. Matías Maruri José María

Vocal: Dr. Khotiaintsev Sergei

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Moctezuma Flores Miguel

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. García Garduño Víctor

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

DR. SERGEI KHOTIAINTSEV

---

**FIRMA**

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	5
Antecedentes .....	5
OBJETIVOS.....	5
Objetivo General de la tesis .....	5
Objetivos Particulares de la Tesis.....	5
CAPÍTULO 1. REJILLAS DE PERIODO LARGO EN FIBRA ÓPTICA .....	5
Introducción.....	5
1.1 ¿Qué es una Rejilla en fibra óptica y cómo funciona? .....	6
1.1.1 Principio de funcionamiento y tipos de Rejillas en fibra óptica.....	6
1.2 Técnicas de Fabricación de RPL en fibra óptica .....	11
1.2.1 Técnicas Permanentes de Grabado de RPL en Fibra Óptica .....	12
1.2.2 Técnicas de Fabricación de Rejillas de Periodo Largo en Fibra Óptica No Permanentes .....	16
Conclusiones .....	17
CAPÍTULO 2. LÁSERES.....	18
Introducción.....	18
2.1 Funcionamiento del Láser .....	18
2.2 Partes principales de un Láser .....	22
2.2.1 Substancia Emisora .....	22
2.2.2 Resonador Óptico .....	23
2.2.3 Fuente de Energía .....	25
2.3 Propiedades del haz láser .....	26
2.3.1 Longitud de Onda.....	26
2.3.2 Potencia del Haz.....	26
2.3.3 Variación de la potencia del haz en el tiempo .....	27
2.3.4 Divergencia y Tamaño del Haz .....	27
2.3.5 Coherencia .....	27
2.3.6 Eficiencia .....	27
2.4 Aplicaciones de los Láseres .....	28
2.4.1 Aplicaciones industriales.....	28
2.4.2 Otras aplicaciones .....	33
Conclusiones .....	33
CAPÍTULO 3. MODELO MATEMÁTICO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA FIBRA ÓPTICA POR EL HAZ LÁSER CO <sub>2</sub> .....	34
Introducción.....	34

3.1 Modelos matemáticos existentes .....	34
3.2 Propiedades del Sílice .....	35
3.3 Modelo matemático básico del calentamiento de la fibra óptica de sílice por medio del haz láser de CO <sub>2</sub> .....	37
3.3.1 Estimación de Energía necesaria para calentar la fibra expuesta al haz láser.....	37
3.3.2 Estimación del Efecto de Conducción Térmica .....	38
3.3.3 Estimación del Efecto de Convección Térmica .....	39
3.3.4 Estimación del Efecto de Radiación Térmica .....	40
3.3.5 Estimación de la Potencia Absorbida.....	41
3.3.6 Modelo matemático Final.....	42
3.4 Resultados.....	45
Conclusiones .....	51
<b>CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL .....</b>	<b>52</b>
Introducción.....	52
4.1 Fuente láser de CO <sub>2</sub> .....	52
4.1.1 Láser de CO <sub>2</sub> .....	52
4.1.2 Sistema de control de potencia y tiempo .....	55
4.2 Sistema de enfoque .....	57
4.2.1 Diodo láser .....	57
4.2.2 Sistema de enfoque .....	57
4.3 Unidad de desplazamiento .....	58
4.4 Equipo de Medición .....	59
Conclusiones .....	59
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
Introducción.....	60
5.1 Descripción del experimento .....	60
5.2 Resultados del experimento .....	61
5.3 Análisis de los resultados .....	62
Conclusiones .....	63
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>APÉNDICE A.....</b>	<b>68</b>

# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes

Las rejillas en fibra óptica surgen a partir del descubrimiento de la fotosensibilidad que presentan las fibras ópticas. En términos generales una rejilla es la modulación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra.

Desde su aparición las Rejillas de Periodo Largo (RPL) en fibra óptica (*Long Period Fiber Grating*, LPFG, por sus siglas en inglés) han sido aplicadas en diversas áreas, desde filtros y compensadores de dispersión en sistemas de comunicaciones, hasta dispositivos detectores de parámetros físicos en sensores. Las rejillas han tenido gran aceptación debido a que es formada en la fibra óptica obteniendo como beneficio estructuras de alto rendimiento, de tamaño pequeño, resistentes y con inmunidad a interferencia electromagnética.

Existen diferentes técnicas para fabricar rejillas, ya sea de periodo largo (RPL) o rejillas de Bragg en fibras ópticas; las técnicas externas son las más usadas y a su vez se dividen en técnicas interferométricas y no interferométricas.

Las técnicas interferométricas toman su nombre por conseguir un patrón de franjas mediante la interferencia de dos haces. Estas técnicas tienen la ventaja de poder ajustar el periodo de la rejilla en forma continua y utilizan componentes ópticos comunes.

Las técnicas no interferométricas se pueden dividir en 2 grupos: las que emplean mascarillas de fase y grabado punto a punto usando un láser enfocado. Estas técnicas son más útiles para RPL dado que los periodos de las rejillas son más grandes que para el caso de rejillas de Bragg.

Por lo anterior, en el presente proyecto se prevé realizar investigaciones teóricas y el desarrollo experimental de la fabricación de RPL en fibra óptica usando la técnica de grabado punto a punto con un láser enfocado de CO<sub>2</sub>.

## OBJETIVOS

### Objetivo General de la tesis

Obtener nuevos conocimientos teóricos y prácticos sobre el proceso de fabricación de Rejillas de Periodo Largo en Fibras Ópticas con un láser enfocado de alta potencia de CO<sub>2</sub> para contar con una base científica específicamente para esta tecnología.

### Objetivos Particulares de la Tesis

- Desarrollar un modelo matemático sobre los efectos térmicos del haz del láser de alta potencia en la fibra óptica.
- Obtener datos como la potencia necesaria y el tiempo de exposición de la fibra para la modificación del diámetro del haz láser enfocado.
- Comparar los resultados obtenidos teóricamente con los experimentales.

# CAPÍTULO 1. REJILLAS DE PERIODO LARGO EN FIBRA ÓPTICA

## Introducción

El continuo crecimiento en el uso de fibras ópticas se debe en gran parte a las ventajas que ofrece respecto a otros medios de transmisión; como lo son bajas pérdidas por transmisión, inmunidad a las interferencias electromagnéticas,

bajo peso, y aislamiento eléctrico. Las ventajas antes mencionadas hacen que la fibra óptica sea de gran interés para las telecomunicaciones, en el área de láseres y en sensores; sin embargo, otra de las ventajas de la fibra óptica y que sin duda ha contribuido a su desarrollo es el hecho de poder usar dispositivos integrados a la misma, como las rejillas en fibra óptica. En un principio las rejillas fueron fabricadas sobre la superficie de guías de onda planas, hasta que se demostró que las rejillas en fibra óptica también son capaces de realizar funciones como reflexión, dispersión y filtrado del campo electromagnético de manera eficiente y con poca atenuación. Actualmente las rejillas en fibra óptica tienen una gran gama de aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones, láseres y sensores.

### 1.1 ¿Qué es una Rejilla en fibra óptica y cómo funciona?

Las rejillas en fibra óptica surgen a partir del descubrimiento de la propiedad de fotosensibilidad en fibras ópticas de sílice dopadas con germanio, descubierto por Hill y colaboradores en 1978 [1,2]. La fotosensibilidad en fibras ópticas se refiere al cambio permanente del índice de refracción del núcleo de la fibra cuando es expuesta a luz de cierta longitud de onda e intensidad, característica que depende del material del núcleo de la fibra óptica. Generalmente, la fotosensibilidad es una propiedad de materiales cristalinos que presentan una no linealidad de segundo orden, lo cual permite que se genere un campo eléctrico interno que provoca el cambio permanente del índice de refracción del material.

Inicialmente se pensaba que este fenómeno solo se presentaba en fibras ópticas con núcleo altamente dopado con germanio y expuestas a luz UV de 240-250 [nm], posteriormente se observó el fenómeno de fotosensibilidad en fibra con otros dopantes expuestas a diferentes longitudes de onda en el rango de la luz UV. Este fenómeno ha dado como resultado una nueva clase de estructuras de fase en fibra óptica, de las cuales, las rejillas en fibra óptica son las más importantes [3].

De manera general, las rejillas en fibra óptica son la modulación del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica; donde el periodo de modulación puede ser uniforme o no uniforme. La forma más simple de rejilla en fibra óptica es en la cual hay una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica monomodo [4]. En este tipo de rejillas, el eje longitudinal de la fibra es normal a los frentes de fase de la rejilla, como se muestra en la figura 1.1.

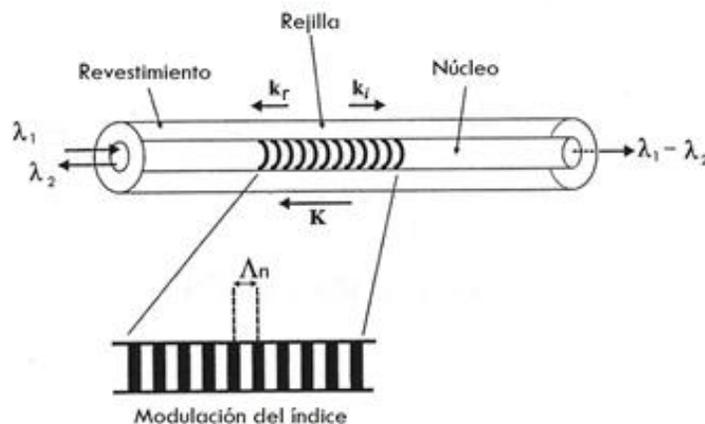


Fig. 1.1- Esquema de una rejilla de Bragg en fibra óptica convencional

#### 1.1.1 Principio de funcionamiento y tipos de Rejillas en fibra óptica

Es posible clasificar a las rejillas en fibra óptica en dos grupos: Rejillas de Bragg o de reflexión y Rejillas de Periodo Largo, RPL, o de transmisión. La principal diferencia entre estos dos grupos de rejillas en fibra óptica es el periodo de modulación del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. En las Rejillas de Bragg en fibra óptica el periodo de modulación es aproximadamente igual a la mitad de la longitud de onda de la luz que incide en la fibra óptica, lo que ocasiona el acoplamiento entre modos ópticos que se propagan en direcciones opuestas. Las RPL en fibra óptica

presentan un periodo cientos de veces mayor a la longitud de onda de la señal incidente, ocasionando un acoplamiento entre el modo fundamental del núcleo y los modos de revestimiento de la fibra óptica con la misma dirección de propagación [4, 5].

### 1.1.1.1 Principio de funcionamiento

La luz que viaja por el núcleo de la fibra óptica, choca y se dispersa por cada uno de los planos de la rejilla. La luz reflejada se comporta de dos casos diferentes; el primero si la condición de Bragg no se cumple y en el segundo cuando esta condición si se satisface. En el primer caso, al no cumplirse la condición de Bragg, la luz reflejada saldrá de fase progresivamente hasta que se cancele por completo; además, cuando la longitud de onda de la luz no coincide con la longitud de onda de resonancia de Bragg experimentará una reflexión tenue en cada plano de la rejilla debido a la falta de coincidencia del índice de refracción, dicha reflexión se acumulará a lo largo de toda la rejilla. En el segundo caso, es decir, cuando la condición de Bragg se satisface, las reflexiones en cada plano se sumarán constructivamente en la dirección contraria a la de propagación original, formando un pico de reflexión con una longitud de onda central definida por los parámetros de la rejilla [4].

La condición de Bragg establece que debe existir conservación de energía y momento. La conservación de energía se cumple cuando la frecuencia de la onda incidente es igual a la frecuencia de la onda reflejada. Para satisfacer la conservación de momento es necesario que la suma del vector de onda incidente,  $k_i$ , y el vector de la rejilla,  $K$ , sea igual al vector de la onda reflejada,  $K_r$ .

$$k_i + K = k_r \quad (1.1)$$

Donde  $K$  tiene una dirección normal a los planos de la rejilla y una magnitud de  $2\pi/\Lambda$ , donde  $\Lambda$  es el periodo de la rejilla. El vector de la onda difractada es igual en magnitud pero con dirección opuesta al vector de onda incidente. Por tanto, la conservación de momento se cumple con la siguiente expresión

$$2 \left[ \frac{2\pi n_{ef}}{\lambda_B} \right] = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.2)$$

Donde  $n_{ef}$  es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica a la longitud de onda central en el espacio libre y  $\lambda_B$  es la longitud de onda de Bragg.

De la fórmula 1.2 podemos obtener una expresión para obtener la longitud de onda de Bragg que es la longitud de onda central en el espacio libre de la luz de entrada que es reflejada por la rejilla, es decir, la longitud de onda en la que ocurre la mayor reflexión [4].

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (1.3)$$

Para explicar de forma más clara como ocurre la reflexión dentro de una rejilla en fibra óptica tomaremos como referencia una rejilla de Bragg uniforme, dado que es la rejilla más simple y una de las más utilizadas. Consideremos que esta rejilla está formada dentro del núcleo de una fibra óptica con un índice de refracción promedio,  $n_0$ . El perfil del índice de refracción está dado por la siguiente expresión

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (1.4)$$

Donde  $\Delta n$  es la amplitud del cambio inducido en el índice de refracción y  $z$  la distancia a lo largo del eje longitudinal de la fibra óptica. De acuerdo con la expresión anterior, la modulación del índice de refracción es de forma sinusoidal, con una amplitud  $\Delta n$ , periodo  $\Lambda$  y un nivel promedio igual a  $n_0$ .

La reflexión en este tipo de rejillas se ha calculado con diferentes métodos. Siguiendo la teoría de modos acoplados de Lam y Garside [6], la reflexión en la rejilla sigue la expresión

$$R(l, \lambda) = \frac{C^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (1.5)$$

Y el coeficiente de reflexión sigue la expresión que se muestra a continuación

$$r(\lambda) = \frac{-C \sinh(sl)}{\Delta k \sinh(sl) + is \cosh(sl)} \quad (1.6)$$

Donde,  $R(l, \lambda)$  es la reflexión en función de la longitud de la rejilla,  $l$ , y la longitud de onda,  $\lambda$ .  $C$  es el coeficiente de acoplamiento,  $\Delta k = k - \pi/\lambda$ , es el vector de onda de desintonización,  $k = 2\pi n_0/\lambda$  es la constante de propagación y  $s^2 = C^2 - \Delta k^2$ . El coeficiente de acoplamiento se obtiene de la siguiente manera

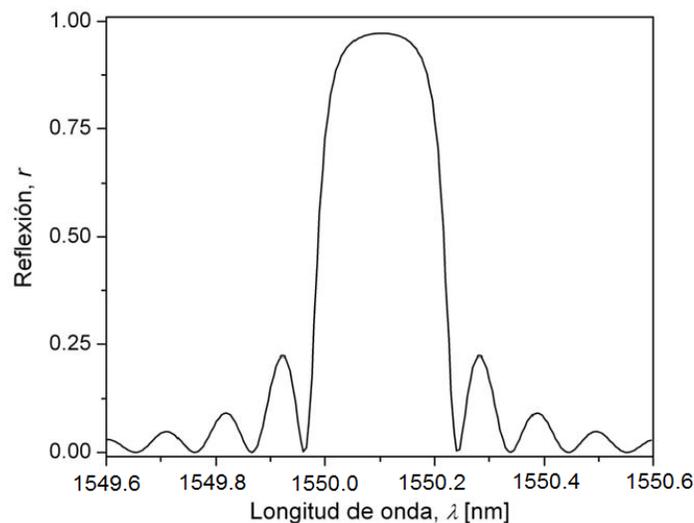
$$C = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} M_p \quad (1.7)$$

Donde  $M_p$  es el factor de confinamiento en el núcleo de la fibra óptica, en otras palabras, indica la fracción de potencia de la señal óptica en el núcleo de la fibra óptica se puede aproximar con  $M_p = 1 - V^2$ , donde  $V$  es la frecuencia normalizada de la fibra

$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) a \sqrt{n_n^2 - n_r^2} \quad (1.8)$$

$a$  es el radio del núcleo de la fibra óptica,  $n_n$  el índice de refracción del núcleo y  $n_r$  el índice de refracción del revestimiento.

La reflexión aumenta con el cambio inducido del índice de refracción; de manera similar al aumentar la longitud de la rejilla se incrementa la reflexión. A continuación se muestra el espectro de reflexión calculado en función de la longitud de onda del modo incidente. En esta gráfica se observa que los modos incidentes con longitud de onda que se encuentra en el rango aproximadamente de 1550.0 – 1550.2 [nm] son reflejados casi en su totalidad, también podemos ver que existen lóbulos laterales que se producen por múltiples reflexiones dadas desde y hacia los extremos de la rejilla.



**Fig. 1.2- Espectro de reflexión de una rejilla en fibra óptica**

Los lóbulos laterales del espectro de reflexión se pueden disminuir o eliminar mediante un proceso llamado apodización. Este proceso se logra cambiando la amplitud de la modulación del índice de refracción gradualmente a lo largo de la rejilla, con lo que se varía el coeficiente de acoplamiento  $C$  [4]. Existen diferentes técnicas de apodización, algunos ejemplos son la apodización de rejillas de Bragg en fibra óptica usando una máscara de fase con eficiencia de difracción variable reportada por Albert et al [7, 8] y la técnica coseno de apodización desarrollada por Kashyap et al [9], por mencionar algunas.

### 1.1.1.2 Tipos de Rejillas de Bragg en Fibra Óptica

Existen diferentes tipos de rejillas de Bragg en fibra óptica, las cuales se pueden distinguir por la separación e inclinación de los planos de la rejilla y si se trata de rejillas simples o múltiples inscritas en la misma posición. A continuación mencionaremos los tipos más importantes de rejillas de Bragg en fibra óptica.

#### Rejilla de Bragg Uniforme

La rejilla de Bragg uniforme es la rejilla de Bragg más simple y usada. Los planos de la rejilla son perpendiculares al eje longitudinal de la fibra óptica y tienen un periodo constante de magnitud. Esta rejilla corresponde al esquema de la figura 1.1. Este tipo de rejillas tiene una amplia gama de aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones, láseres y en sensores.

#### Rejilla de Bragg Inclinada

Este tipo de rejilla se caracteriza por tener en sus planos un ángulo de inclinación respecto al eje longitudinal de la fibra óptica. Esta inclinación provoca que los modos guiados en el núcleo de la fibra se acoplen con modos guiados en el revestimiento o con modos de radiación. La eficiencia del acoplamiento depende del ángulo de inclinación de los planos de la rejilla y de la magnitud de la modulación del índice de refracción. Cabe mencionar que la condición de Bragg es similar a la de las rejillas de Bragg uniformes, pero la longitud de onda de Bragg cambia, dado que no solo los modos con diferentes longitud de onda emergen a diferentes ángulos, sino diferentes modos con la misma longitud de onda también emergen con ángulos ligeramente diferentes, debido a sus distintas constantes de propagación [4]. En la siguiente figura se muestra un esquema de Rejilla de Bragg inclinada.

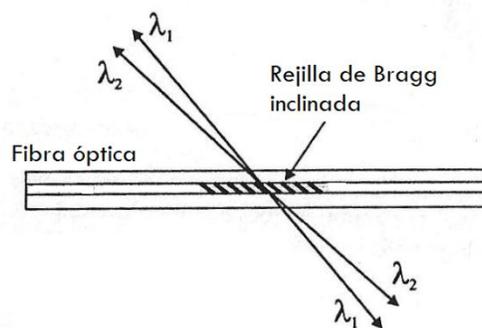
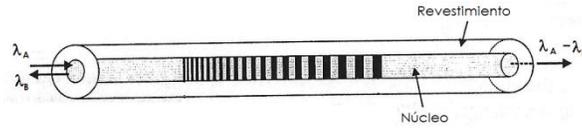


Fig. 1.3- Rejilla de Bragg inclinada

#### Rejilla de Bragg de Periodo Variable

Las rejillas de este tipo, como su nombre lo dice, presentan una variación monótona del periodo de modulación del índice de refracción, como se muestra en la figura 1.4. Estas rejillas presentan características que se consideran ventajas para aplicaciones específicas en telecomunicaciones y sensores [4].



**Fig. 1.4- Rejilla de Bragg de periodo variable**

Dentro de este tipo de rejillas, las más simples son las que presentan una variación lineal del periodo de modulación del índice de refracción, esta variación sigue la expresión que se muestra a continuación

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z \quad (1.9)$$

Donde  $\Lambda_0$  es el periodo de inicio y  $\Lambda_1$  es el cambio lineal a lo largo de la longitud de la rejilla.

### **Rejilla de Bragg Múltiple Sobrepuesta**

Este tipo de rejillas se forma por la inscripción de varias rejillas de Bragg en la misma posición de la fibra óptica. Estas rejillas son diseñadas para reflejar varias señales con diferentes longitudes de onda. Este tipo de rejilla fue reportado por Othonos et al [10] en donde se demostró que es posible inscribir varias rejillas de Bragg con diferentes longitudes de Bragg; sin embargo, la reflexión de las rejillas grabadas con anterioridad disminuye y su longitud de onda central se recorre a una mayor debido al cambio del índice de refracción efectivo.

### **Rejillas de Bragg de Fase Recorrida**

Las rejillas de Bragg de fase recorrida tiene la característica de funcionar como filtros de transmisión de banda angosta, en lugar de comportarse como un filtro de reflexión. Este tipo de rejillas se obtienen introduciendo un corrimiento de fase a través de la misma, cuya localización y magnitud puede ajustarse para diseñar un espectro de transmisión específico. Este proceso produce dos rejillas que actúan como un resonador Fabry-Perot de longitud de onda selectivo, donde la longitud de onda de resonancia depende del tamaño del cambio de fase [4, 11].

#### **1.1.1.3 Tipos de Rejilla de Periodo Largo en Fibra Óptica**

Las RPL en fibra óptica son una forma especial de rejilla de Bragg; reportadas por primera vez por Vengsarkar et al [12]. En este tipo de rejillas el periodo se elige de manera que permita el acoplamiento de luz entre el modo fundamental del núcleo y los modos del revestimiento [5, 13].

Las RPL en fibra óptica satisfacen la condición de Bragg de ajuste de fase entre el modo guiado fundamental del núcleo y los modos guiados del revestimiento o los modos de radiación u modo guiado del núcleo. Esta condición está dada por

$$\beta_{01} - \beta = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1.10)$$

Donde  $\Lambda$  es el periodo de la rejilla,  $\beta_{01}$  y  $\beta$  son las constantes de propagación del modo fundamental del núcleo y del modo con el que ocurre el acoplamiento, respectivamente. En RPL en fibra óptica  $\Delta\beta$  es pequeño, por esta razón el periodo  $\Lambda$  está en el rango de centenas de micrómetros comparado con las rejillas de Bragg convencionales de periodos del orden de un micrómetro.

Por el hecho de que  $\Delta\beta$  es discreto y está en función de la longitud de onda, el acoplamiento entre el modo fundamental del núcleo y los modos de revestimiento es altamente selectivo, lo cual lleva a una pérdida dependiente de la longitud de onda; por lo mencionado anteriormente, cualquier modulación de las propiedades del núcleo o el revestimiento de la fibra óptica modifica la respuesta espectral de la RPL, esto las convierte en dispositivos que se pueden utilizar para propósitos de detección de parámetros físicos [4].

Dentro del grupo de RPL en fibra óptica existen diferentes tipos, como en el caso de las Rejillas de Bragg. A continuación se explicaran los principales tipos de RPL.

### *Rejilla de Periodo Largo Uniforme*

Este tipo de rejillas tiene sus planos perpendiculares al eje longitudinal de la fibra óptica y tiene un periodo constante. Estas rejillas son capaces de acoplar luz entre el modo fundamental del núcleo y modos del revestimiento de distinto orden, provocando en el espectro de transmisión una serie de bandas de atenuación, donde la longitud de onda de estas bandas o longitud de onda de Bragg se expresa con la siguiente expresión

$$\lambda_B = (n_n - n_r)\Lambda = \Delta n_{ef} \Lambda \quad (1.11)$$

Donde  $n_n$  es el índice de refracción efectivo del modo del núcleo de la fibra,  $n_r$  es el índice de refracción efectivo del modo de revestimiento de la fibra,  $\Lambda$  es el periodo y  $\Delta n_e$  es la diferencia de los índices de refracción efectivos del modo del núcleo y del revestimiento [5].

### *Rejillas de Periodo Largo en Fibra Óptica Inclinada*

De manera similar a las rejillas de Bragg, estas presentan en sus planos un ángulo de inclinación con respecto al eje longitudinal de la fibra óptica, lo que aumenta el acoplamiento entre el modo fundamental del núcleo y los modos del revestimiento.

### *Rejillas de Periodo Largo en Fibra Óptica de Periodo Variable*

El periodo de modulación del índice de refracción de la rejilla presenta una variación, que podemos expresar de manera similar que en el caso de rejillas de Bragg de periodo variable; la diferencia es que en el caso de las RPL el periodo es mucho mayor que en las rejillas de Bragg, por tanto la longitud de onda de Bragg está en función del eje longitudinal de la fibra óptica, por tanto la expresión de la longitud de onda de Bragg se puede expresar con la siguiente fórmula

$$\lambda_B = \Delta n_{ef}(z)\Lambda(z) \quad (1.12)$$

Esta clase de rejillas se emplea para la compensación de dispersión cromática en sistemas de largo alcance y de alta velocidad de transmisión [13].

### *Rejillas de Periodo Largo en Fibra Óptica de Fase Recorrida*

Al introducir un corrimiento de fase en una RPL se puede crear una banda de paso muy angosta dentro de la banda de paso en el espectro de transmisión de la rejilla. Al igual que con las rejillas de Bragg de fase recorrida, el corrimiento de fase tiene una localización y magnitud que puede ajustarse para la obtención de un espectro de transmisión específico [5, 14].

## **1.2 Técnicas de Fabricación de RPL en fibra óptica**

Existen diferentes técnicas de fabricación de RPL en fibra óptica que se han desarrollado desde la aparición de éstas; sin embargo, gran parte de las técnicas para su fabricación también sirven para rejillas de Bragg. En un principio la fabricación de rejillas en fibra óptica se hacía con técnicas basadas en el uso de la propiedad de fotosensibilidad de las fibras óptica a la luz UV. En los últimos años se han desarrollado otro tipo de técnicas que poseen ciertas ventajas sobre las técnicas antes mencionadas; por ejemplo, el uso de otras fuentes como el láser de CO<sub>2</sub> en lugar de alguno que emita luz UV, que se refleja en un menor costo y otras ventajas que se mencionaran en esta sección.

En general, las técnicas de fabricación de RPL en fibra óptica se pueden dividir en 2 grupos, las técnicas permanentes y las no permanentes. Como su nombre lo dice, las técnicas permanentes producen una modulación fija en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, mientras que las no permanentes solo inducen un cambio en el índice de manera temporal.

### 1.2.1 Técnicas Permanentes de Grabado de RPL en Fibra Óptica

Este grupo de técnicas de fabricación de RPL en fibra óptica se encuentran los métodos de grabado punto a punto por medio de un láser enfocado, el cual es el método utilizado para la fabricación de RPL en fibra óptica del presente trabajo. También podemos encontrar técnicas basadas en la propiedad de fotosensibilidad y técnicas donde se ocupa alguna máscara de fase. Cabe mencionar que estas técnicas también funcionan para la fabricación de rejillas de Bragg, sin embargo existen algunas que se han modificado solamente para la fabricación de RPL en fibra óptica. A continuación se describirán las técnicas más utilizadas.

#### 1.2.1.1 Técnicas de Fabricación de RPL en Fibra Óptica basadas en la Fotosensibilidad

Las técnicas de esta sección se pueden clasificar de acuerdo a la forma en que son grabadas las rejillas, de tal manera que tenemos técnica de inscripción interna, técnicas interferométricas y de máscara de fase. Cabe mencionar que la técnica de inscripción interna fue la primera en desarrollarse, pero las rejillas grabadas con este método funcionan en un rango muy pequeño longitudes de onda y por tanto su aplicación está muy restringida. En general la técnica más utilizada en este grupo es la de mascarilla de fase.

##### ➤ *Inscripción Interna*

Esta técnica fue utilizada por Hill et al [1, 2] en 1978. El cambio en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica se produce con un láser de monocromático cuya absorción de dos fotones esté en la región de la luz UV. A pesar de la simplicidad de esta técnica, las rejillas están limitadas en su operación a que la longitud de onda de Bragg coincida con la longitud de onda del láser. En la figura 1.4 se muestra el esquema experimental para el grabado de rejillas en fibra óptica mediante esta técnica.

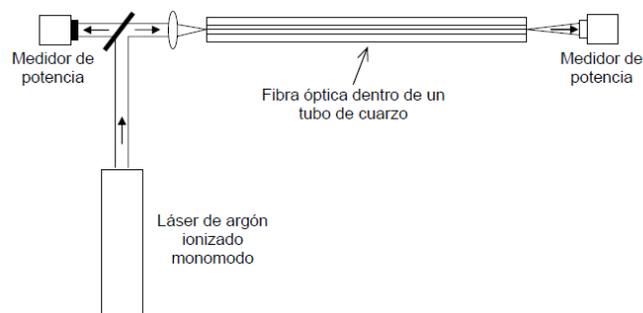


Fig. 1.5- Técnica de inscripción interna de rejillas en fibra óptica

La configuración usada por Hill consta de un láser de argón ionizado, que opera a una longitud de onda de 514.5 nm (o 488 nm), cuyo haz láser irradia la fibra óptica que se encuentra en un tubo de aislamiento térmico, usado para aislar el láser del haz reflejado. La luz coherente que se propaga en el interior de la fibra interfiere con una pequeña cantidad de luz reflejada por el extremo terminal de la fibra, formando un patrón de onda estacionaria; los puntos de alta intensidad modifican el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica.

El principal inconveniente de las rejillas fabricadas con esta técnica es que el cambio en el índice de refracción es muy pequeño; por tanto, los espectros de reflexión solo son útiles cuando la longitud de la rejilla es grande, aproximadamente de unas decenas de centímetros.

## ➤ Técnicas Interferométricas

La técnica propuesta por Meltz et al [15], llamada técnica holográfica transversal, demostró que las rejillas pueden grabarse de manera externa en fibra fotosensibles a la luz UV. Las rejillas pueden ser grabadas de dos maneras diferentes, con un interferómetro de división de amplitud y con un interferómetro de división de frente de onda.

### Interferómetro de división de amplitud

Este es el tipo de interferómetro que utilizó Meltz para sus experimentos. En la figura 1.5 se observa el esquema experimental de un interferómetro de este tipo. El interferómetro se encarga de dividir el haz del láser en 2 haces utilizando un separador de haces, posteriormente dos espejos dirigen los dos haces a un mismo punto con un ángulo de diferencia entre ellos, lo cual ocasiona la formación de un patrón de interferencia donde la fibra es expuesta para inducir la modulación del índice de refracción.

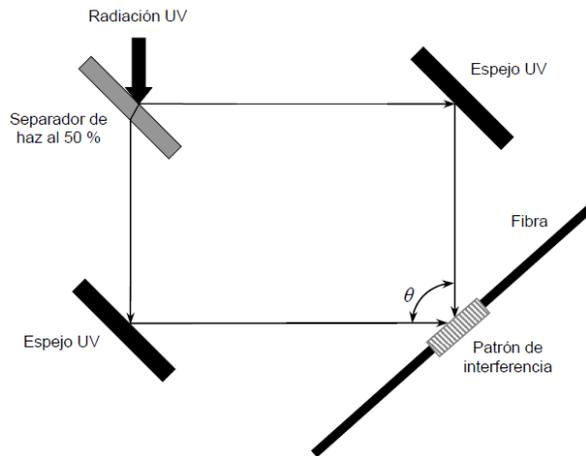


Fig. 1.6- Técnica interferométrica para fabricar rejillas en fibra óptica

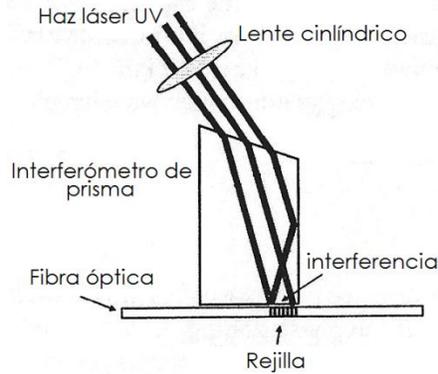
La longitud de onda de Bragg depende de varios factores, como podemos observar en la siguiente expresión [4].

$$\lambda_B = \frac{n_e \lambda_w}{\sin(\theta/2)} \quad (1.13)$$

Donde  $n_e$  es el índice efectivo del núcleo de la fibra,  $\lambda_w$  es la longitud de onda de la luz UV del láser y  $\theta$  es el ángulo de intersección de los haces. Esta expresión nos deja ver que es posible variar la longitud de onda de Bragg de manera sencilla, es decir, modificando  $\lambda_w$  o  $\theta$ .

### Interferómetro de División de Frente de Onda

Este tipo de técnica no es tan común como la anterior, sin embargo presenta ciertas ventajas sobre la técnica descrita anteriormente, como el usar un solo elemento óptico. Dentro de los principales interferómetros de este tipo se encuentra el interferómetro de prisma [16, 17]. El prisma utilizado debe tener características muy buenas de transmisión en el rango de la luz UV. En la figura 1.6 se muestra el esquema utilizado para la fabricación de rejillas en fibra óptica.



**Fig. 1.7-Técnica de fabricación interferométrica de rejillas en fibra óptica**

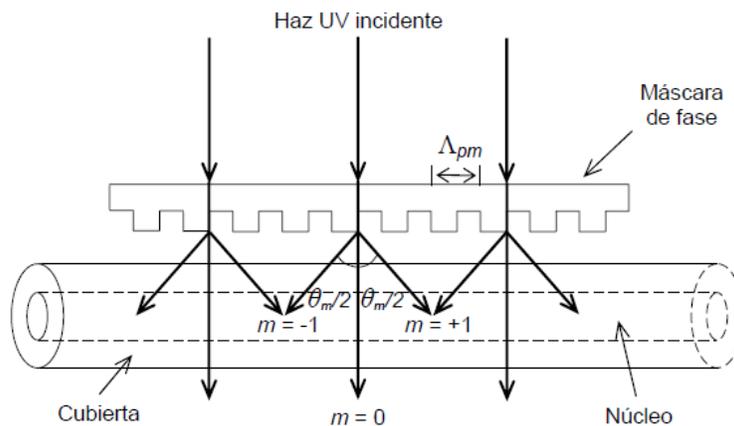
El haz de luz UV es espacialmente dividido en dos haces por el borde superior del prisma; uno de esos haces es espacialmente invertido por la reflexión total interna de la cara lateral del prisma. Los dos haces se recombinan para formar el patrón de interferencia que grabará la rejilla en el núcleo de la fibra.

**Técnica de Máscara de Fase**

Uno de los métodos más eficientes para el grabado de rejillas en fibra óptica, tanto de periodo largo como de Bragg es la técnica de uso de máscara de fase. Comencemos definiendo que es una máscara de fase, las máscaras de fase son rejillas de difracción formadas por surcos de relieve grabados en un plato de sílice transparente a la luz UV. Cuando la luz UV incide en la máscara de fase se produce una difracción en varios órdenes. Los órdenes de incidencia y difractados deben satisfacer la siguiente ecuación [18]

$$\Lambda_{pm} = \frac{m\lambda_w}{\text{sen} \frac{\theta_m}{2} - \text{sen} \theta_i} \tag{1.14}$$

Donde  $\Lambda_{pm}$  es el periodo de la mascarilla de fase,  $\theta_m/2$  es el ángulo del orden difractado,  $\lambda_w$  es la longitud de onda de la luz UV y  $\theta_i$  es el ángulo del haz UV incidente. A continuación en la figura 1.7 se muestra la configuración para grabar rejillas con esta técnica.



**Fig. 1.8-Técnica de máscara de fase para inscribir rejillas en fibra óptica**

Cuando el periodo de la rejilla cae entre  $\lambda_w$  y  $\lambda_w/2$ , la onda incidente se refracta solo en un orden ( $m=-1$ ) y el resto de la potencia permanece en la onda transmitida ( $m=0$ ).

En caso de que el ángulo de incidencia sea cero, el haz UV se divide en los siguientes órdenes  $m=0$  y  $m=\pm 1$ . Los órdenes  $\pm 1$  producen un periodo de interferencia  $\Lambda_m$  que depende del ángulo de difracción.

$$\Lambda_m = \frac{N\lambda_w}{2 \sin \frac{\theta_m}{2}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (1.15)$$

El periodo relacionado con la longitud de onda de Bragg se puede obtener con la siguiente expresión [18]

$$\Lambda_m = \frac{N\lambda_B}{2 n_{ef}} = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (1.16)$$

Donde  $N \geq 1$ , es un entero e indica el orden del periodo de la rejilla.

El procedimiento de grabado de las rejillas mediante esta técnica es similar al de las técnicas interferométricas si consideramos que la máscara de fase sustituye al separados de haces; aunque, en este caso es importante que la intensidad del orden cero o de transmisión se minimice o sea bloqueada en su totalidad.

### 1.2.1.2 Técnica de Grabado Punto a Punto

Esta técnica fue propuesta por Malo et al [19] para la fabricación de rejillas de Bragg. El cambio del índice de refracción, que corresponde a los planos de la rejilla, se forma uno tras otro a lo largo del núcleo de la fibra óptica. El principio de esta técnica consiste en hacer pasar un pulso de luz UV por una rendija y posteriormente a través de un lente. El lente enfoca el haz en un costado de la fibra óptica, de esta manera, la sección de la fibra óptica expuesta al haz cambia su índice de refracción dado que se forma un elemento o plano de la rejilla, como se muestra en la figura 1.8. Para seguir con el grabado de los demás elementos de la rejilla es necesario recorrer la fibra óptica una distancia correspondiente al periodo de la rejilla, de la misma forma, el proceso se sigue hasta formar toda la estructura de la rejilla.

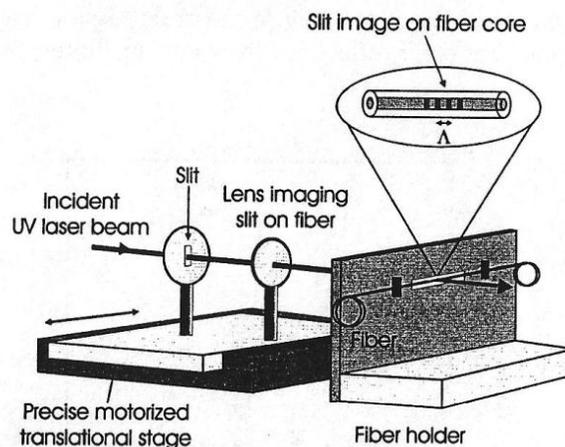


Fig. 1.9-Técnica de fabricación punto a punto

La fabricación de rejillas mediante esta técnica tiene ciertas ventajas sobre las técnicas antes mencionadas. Una de las principales ventajas es la flexibilidad que se tiene para cambiar parámetros de las rejillas como el periodo y la respuesta espectral de manera sencilla. Con esta técnica las rejillas de periodo variable pueden fabricarse con facilidad.

Con el surgimiento de las RPL en fibra óptica, también se desarrollan técnicas para su fabricación o se modifican algunas existentes. Davis et al [20] empleó el procedimiento de grabado punto a punto, descrito anteriormente, pero cambió el láser de luz UV por un láser de  $\text{CO}_2$  con una longitud de onda de operación de  $10.6 \mu\text{m}$ . Esta técnica se ve limitada por la

longitud de onda de la luz emitida por la fuente láser; sin embargo, para la fabricación de RPL en fibra óptica esto no representa un gran problema debido a que los periodos de estas rejillas están en el rango de cientos de micrómetros, por lo que se puede utilizar una fuente de luz con una longitud de onda mayor a la de la luz UV.

Al utilizar este método de fabricación de rejillas, es necesario utilizar una unidad de desplazamiento que sea suficientemente sensible para trasladar la fibra óptica en intervalos pequeños equivalentes al periodo de la rejilla que se desee construir; además, esta unidad de desplazamiento debe ser exacta en sus desplazamientos para evitar variaciones en el periodo de modulación del índice de refracción de la fibra óptica.

Actualmente esta técnica ha sido de las más utilizadas y desarrolladas en los últimos años, gracias a su gran versatilidad. Por tal motivo existen varias publicaciones donde se ha aplicado esta técnica de grabado utilizando un láser de CO<sub>2</sub> enfocado para la fabricación de rejillas en diferentes tipos de fibras ópticas, desde fibras de sílice, dopadas con algún material o cargadas con hidrógeno [21-26] o en donde se cambia el tipo de láser [27].

### ***1.2.1.3 Técnica de Fabricación de Rejillas de Periodo Largo en Fibra Óptica con un Arco Eléctrico***

Esta técnica de fabricación es parecida a la de grabado punto a punto, la diferencia es que la fuente láser se cambia por un arco eléctrico, producido por dos electrodos, al que se expone la fibra óptica para grabar los elementos o planos de la rejilla. Siguiendo el principio de la técnica de grabado punto a punto, la fibra debe desplazarse para formar cada uno de los elementos de la rejilla, lo cual implica tener una unidad de desplazamiento de alta precisión, como en el caso del grabado punto a punto [28, 29].

Las rejillas fabricadas con esta técnica se pueden dividir en 3 grupos: rejillas de deformación física, rejillas de campo de modo modificad y rejillas de índice modulado. En el primer grupo la tensión física a la que se somete a la fibra óptica es alta y la corriente es de aproximadamente 7 mA, las rejillas de este grupo presentan una gran capacidad de acoplamiento de modos; en las rejillas del segundo grupo no se utiliza tensión física en la fibra y la corriente es mayor que en las anteriores (aproximadamente de 10 a 16 mA) y tiene una gran resistencia mecánica; finalmente en el tercer grupo se tiene la fibra que se fabrican con una tensión y corriente baja, pero son las que presentan una capacidad de acoplamiento de modos y una resistencia mecánica altas.

### ***1.2.1.4 Técnica de Termo-difusión de un Dopante***

El principio de esta técnica consiste en la difusión de un dopante del revestimiento de la fibra hacia el núcleo de la fibra óptica de sílice de forma térmica [30]. Para la fabricación de RPL en fibra óptica mediante esta técnica, es necesario en primer lugar un dopante y en segundo lugar una fuente para elevar la temperatura de la fibra y lograr la difusión del dopante. El nitrógeno tiene un peso atómico bajo y se difunde rápidamente en el sílice cuando se aumenta la temperatura, esto ocasiona un cambio en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. Por otra parte, como fuente de calor se puede utilizar un láser de CO<sub>2</sub> o un arco eléctrico para cumplir con el fin de esta técnica. Después de difundir el dopante en la fibra óptica es necesario grabar la rejilla por medio de la técnica de grabado punto a punto.

Las rejillas fabricadas con esta técnica tienen la ventaja de ser más resistentes a los cambios de temperatura que las rejillas fotoinducidas de forma convencional, esto se debe a que la difusión del nitrógeno se puede iniciar a temperaturas entre los 1400°C y 1600°C.

## **1.2.2 Técnicas de Fabricación de Rejillas de Periodo Largo en Fibra Óptica No Permanentes**

Es posible fabricar RPL en cualquier tipo de fibra óptica por medio de inducción mecánica. Esta técnica consiste en producir microcurvaturas en la fibra óptica que actuaran con una RPL acoplando el modo fundamental del núcleo con modos del revestimiento. Las microcurvaturas pueden producirse de diferentes maneras, a continuación mencionaremos algunas.

La técnica propuesta por Sohn et al [31] consiste en un plato plano con un arreglo de varillas de grafito, donde es colocada la fibra óptica. Sobre la fibra óptica se pone otro plato plano al que se le aplicara presión para formar las microcurvaturas en la fibra y generar el efecto de tener una RPL en esa sección de fibra óptica. El periodo de la rejilla será proporcional al ángulo de la fibra óptica sobre las varillas. Las longitudes de onda pueden sintonizarse en un rango de al menos 200 nm con una pérdida baja, fuera de las bandas de atenuación. La intensidad de acoplamiento de las rejillas se ajusta aumentando la presión, de tal manera que al aumentar la presión en el plato que se encuentra sobre la fibra óptica también se incrementa la intensidad de acoplamiento. Sin embargo, este efecto puede revertirse, es decir, regresar la fibra óptica a la forma original (sin microcurvaturas) simplemente con el hecho de no ejercer presión en la fibra óptica.

Otro método para fabricar RPL en fibra óptica por inducción mecánica es el que utilizó Yokouch et al [32] donde la presión aplicada a la fibra óptica es ejercida por un resorte en forma de espiral hecho de acero. La fibra óptica es colocada en una base metálica en forma de U, posteriormente el resorte se inserta en la base. Al resorte se le aplica presión para formar las microcurvaturas en la fibra óptica y que se produzca el efecto de la RPL. En este caso el periodo de la rejilla es igual a la separación de los espirales del resorte. Al igual que en la otra técnica, la intensidad de acoplamiento de modos se modifica aumentando o disminuyendo la presión en la fibra óptica. El periodo de la rejilla y la longitud de onda de resonancia pueden variarse modificando la separación de los espirales.

Las rejillas fabricadas por inducción mecánica tienen ciertas ventajas sobre las rejillas fabricadas con técnicas permanentes. Un ejemplo de estas ventajas es que podemos regresar la fibra óptica a su forma original, lo que nos permite modificar la rejilla que se tiene en esa fibra óptica. Por otra parte, estas rejillas son más resistentes que las producidas con otras técnicas dado que no se le quita el recubrimiento a la fibra óptica para fabricar la rejilla y por tanto son más resistentes que las otras rejillas.

## Conclusiones

Las RPL en fibra óptica, ha tenido una gran aceptación en la industria y en la investigación, principalmente por las ventajas que presentan, sobre otro tipo de dispositivos como electrónicos o mecánicos, por ejemplo la inmunidad a las interferencias electromagnéticas y el amplio rango de temperaturas a las que pueden operar.

Como se ha visto en esta sección, existen diferentes técnicas para fabricar rejillas en fibra óptica; sin embargo, la técnica de grabado punto a punto es una de las más versátiles y usadas porque se pueden variar fácilmente los parámetros de la rejilla, como el periodo de modulación, de tal manera que la fabricación de rejillas de diferentes parámetros no es costosa como en el caso de las técnicas que utilizan mascarillas; otra de las ventajas que presenta esta técnica de fabricación de RPL en fibra óptica es el uso de láseres menos costos, como el de CO<sub>2</sub>, en comparación con láseres que operan en el UV requeridos en otras técnicas.

La técnica de grabado punto a punto con un láser enfocado es ideal para el grabado de RPL en fibra óptica, dado que, los periodos de estas rejillas son mayores a los periodos en rejillas de Bragg, es decir, mientras que en rejillas de Bragg el periodo de modulación es aproximadamente de la mitad de la longitud de onda de operación en el caso de RPL en fibra óptica éste puede ser de cientos de veces la longitud de onda de la rejilla. Esta técnica tiene una gran flexibilidad para modificar los parámetros de la rejilla, así como el periodo y la frecuencia de operación de la misma.

# CAPÍTULO 2. LÁSERES

## Introducción

Para comenzar nuestro capítulo mencionaremos de donde viene la palabra LASER; esta palabra está formada por las iniciales de la frase “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación). Como su nombre lo dice el láser es un dispositivo amplificador, que utiliza el fenómeno de emisión estimulada para realizar su función [1, 2].

En la frase anterior se menciona que el láser amplifica la luz por “*emisión estimulada*”, este fenómeno fue observado por primera vez en 1917, por Albert Einstein, y se basa en el principio de que los átomos y moléculas espontáneamente emiten energía en forma de luz o de otro tipo de radiación electromagnética, este fenómeno es conocido como emisión espontánea, pero se observó que al estimular a los electrones de los átomos con una fuente externa de luz pueden realizar este proceso de emitir energía extra en forma radiante, como de luz, con la misma frecuencia y la misma dirección que la de la fuente que lo estimuló, a esto se le llama “emisión estimulada” [2, 3].

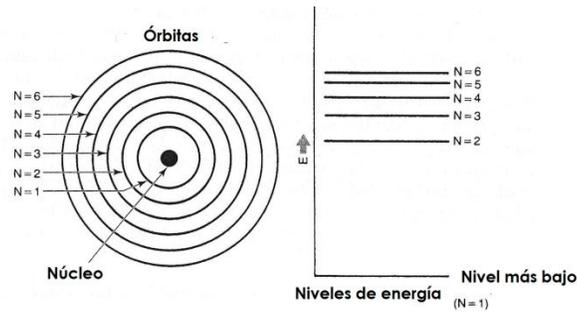
A pesar de que este fenómeno se observó por primera vez, fue hasta 1951, cuando Charles H. Townes concibió la idea de usar el fenómeno de emisión estimulada para amplificar frecuencias en la banda de microondas. Townes llamó a su dispositivo MASER, que se forma con las iniciales de “*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”. Este dispositivo se adaptó para otros tipos de radiación electromagnética, aunque el siguiente paso era aplicarlo a la amplificación de frecuencias más altas, como las frecuencias ópticas. En 1957 Townes fue el primero en investigar seriamente como se podría usar este fenómeno en el campo de la óptica. Años más tarde, en 1960, Theodore H. Maiman construyó el primer laser, formado con una barra de rubí, con espejos reflejantes en cada extremo y una lámpara flash o de destellos como fuente excitadora [1]. Poco después se encontró que varios materiales podían servir para fabricar láseres que funcionarían a diferentes frecuencias y con características diferentes; por otra parte el desarrollo de los láseres fue impulsado en gran parte por la industria debido a las ventajas que representan los sistemas láser en comparación con otras tecnologías.

## 2.1 Funcionamiento del Láser

El proceso de la emisión de luz en un láser se basa en el fenómeno de emisión estimulada, como ya lo mencionamos anteriormente, este proceso consiste en excitar a los átomos con una fuente externa para que libere energía en forma de fotones, cada uno con igual longitud de onda y dirección de desplazamiento que los primeros. En general, el principio de funcionamiento de un láser es así, aunque es necesario explicar más acerca de esto para comprender mejor la forma en que se amplifica la luz de un láser y también para poder explicar de una mejor manera los diferentes tipos de láseres y sus características que serán mencionadas posteriormente en este capítulo.

El principio central de un láser es la cuantización de los niveles de energía dentro de los átomos o dentro de las moléculas. Como sabemos, los átomos y las moléculas tienen determinado número de niveles de energía, para pasar de un nivel a otro se necesita la absorción o emisión de cantidades discretas de radiación electromagnética, los intervalos entre los niveles de energía y las frecuencias de radiación son una característica del material y por tanto son distintos entre los diferentes elementos.

Los niveles de energía que ocupan los electrones dentro de los átomos son la forma más simple de explicar; aunque existen otros tipos de niveles de energía. Nosotros tomaremos como ejemplo el átomo de hidrógeno que en su núcleo solo tiene 1 protón y fuera de él tiene un electrón y 6 órbitas que también son llamadas “*niveles de energía*.” En la siguiente figura se muestran un esquema del átomo de hidrógeno con sus respectivos niveles de energía.



**Fig.2.1- Niveles de energía del átomo de hidrógeno**

Los átomos tienden a estar en su nivel más bajo de energía, por tanto, al excitar un átomo y hacer que su electrón llegue al último o más alto nivel de energía, éste liberará la energía necesaria para llegar al primer nivel de energía. En el caso del átomo de hidrógeno, se tienen 6 niveles de energía, en donde el nivel 1 es el estado fundamental del átomo, por tanto cuando se excita hasta el nivel 6, el átomo liberará energía para regresar a su nivel fundamental de energía.

Como mencionamos antes, existen otros tipos de niveles de energía, por ejemplo, las moléculas también tienen niveles de energía como los átomos que se incrementan en complejidad con el número de átomos que tengan en ellas. Las moléculas también tienen niveles de energía que dependen de la vibración de los átomos dentro de ellas y también dependen de la rotación de todas las moléculas. Cabe mencionar que todos estos niveles son cuantizados [1].

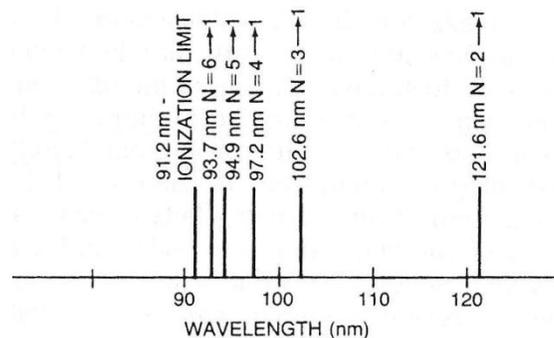
La transición que los átomos y las moléculas realizan entre los niveles de energía es una parte crucial para el funcionamiento del láser. La diferencia entre la energía que se necesita para pasar de un nivel a otro se llama “energía de transición.” Por tanto, para mover un electrón del nivel fundamental al siguiente nivel de energía, el electrón debe absorber un fotón con la misma energía que necesita para moverse al siguiente nivel, por tanto, cuando dicho electrón pasa a su estado fundamental libera un fotón con energía igual a la de transición, lo que significa que un átomo puede emitir luz de una sola longitud de onda, correspondiente a la energía de transición [1].

Las series de longitudes de onda que puede emitir un átomo son llamadas Líneas de Lyman, las cuales fueron descubiertas por el físico Theodore Lyman y dadas por la siguiente fórmula

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad 2.1$$

Donde m es el número cuántico del nivel inferior de energía, n el número cuántico del nivel superior de energía y R es la constante de Rydberg ( $109,678 \text{ mc}^{-1}$ ).

Las líneas de Lyman para el átomo de hidrógeno son mostradas en la siguiente figura.



**Fig.2.2-Líneas de Lyman**

Como podemos observar en la figura, el átomo de hidrógeno tiene diferentes longitudes de onda, este número de líneas aumentan con la complejidad del átomo o de las moléculas. Es por eso que cada transición tiene su propia probabilidad que depende de la población de los dos niveles de energía y de sus características cuánticas [1].

Como se ha mencionado anteriormente, existen diferentes tipos de transición en los átomos y las moléculas. En el caso del átomo de hidrógeno, se presentan transiciones llamadas “Transiciones electrónicas”, tomando su nombre por que implican el movimiento de electrones entre dos niveles de energía. Este tipo de transición puede existir en las moléculas como en los átomos, aunque es más común encontrar láseres con transición electrónica con átomos [1].

Las moléculas tienen dos formas más de transición, estas formas pueden cuantizar los niveles de energía con una energía menor que la transición electrónica. La transición vibracional de los átomos en las moléculas típicamente tiene longitudes de onda menores a 10 micrómetros. Las que involucran transición rotacional pueden producir longitudes de onda menores a los 100 micrómetros [1].

El láser que utilizaremos en nuestro proyecto tiene una transición vibracional, por lo cual posteriormente la explicaremos más a detalle.

Como hemos visto anteriormente, para que un electrón se mueva de un nivel de energía a otro de mayor energía necesita absorber la energía necesaria para realizar la transición, pero existen dos problemas fundamentalmente, el hecho de que un átomo o molécula puede tener diferentes valores de energía de transición y el otro problema es que los átomos o las moléculas no están aislados, existen otros a su alrededor intercambiando energía constantemente ocasionando el que los electrones cambien de nivel de energía. Dichos factores hacen más difícil que un átomo pueda recibir la energía necesaria para que realice su transición.

Hasta el momento hemos hablado de cómo el electrón de un átomo o de una molécula puede cambiar de nivel de energía, lo cual nos servirá como introducción para los siguientes temas. Ahora nos enfocaremos en la emisión estimulada en un láser y de cómo se lleva a cabo la población inversa dentro del mismo.

Es importante mencionar la diferencia entre emisión espontánea y emisión estimulada. Como su nombre lo dice, la emisión espontánea se refiere al hecho de que un átomo libere energía por sí mismo, sin necesidad de que una fuente externa lo tenga que excitar. Este fenómeno fue observado por Albert Einstein, quien se percató de que este fenómeno podría ocurrir si se estimulaba el átomo con una fuente externa, el cual liberaría energía con la misma longitud de onda y estaría en la misma fase que el que lo excitó [1].

La emisión estimulada no es tan fácil de lograr, debido a lo que ocurre con la absorción, es decir, podemos tener una gran cantidad de átomos o moléculas en su estado fundamental, dispuestos a absorber cierta cantidad de energía y pasar a un estado más excitado. Sin embargo también existe una gran cantidad de átomos y moléculas en otros niveles de energía, simplemente porque existe cierta energía termodinámica en ellos.

Para que se lleve a cabo la emisión estimulada se considera que la mayoría de los átomos se encuentran en un estado excitado, por tanto es más probable que liberen energía con la excitación de un fotón, a que un átomo que se encuentra en su estado fundamental absorba dicha energía. Al hecho de tener más átomos excitados que en su estado fundamental se llama “inversión de la población” dado que el número de fotones que produce el medio excitado es mayor a los que absorbe [2].

Cabe mencionar que la emisión estimulada continúa mientras exista la inversión de población, en otras palabras, la emisión estimulada se detiene cuando la mayoría de átomos o moléculas están en su estado fundamental, por tanto los fotones tienen más probabilidades de ser absorbidos en lugar de producir la emisión estimulada [1, 2].

En un principio, la población inversa se puede producir en diferentes transiciones; en la práctica, es necesario que ocurra entre dos niveles de energía para que comience la emisión láser.

Es importante mencionar que el calor aumenta la población en un estado más alto de energía, pero no puede producir una inversión de población.

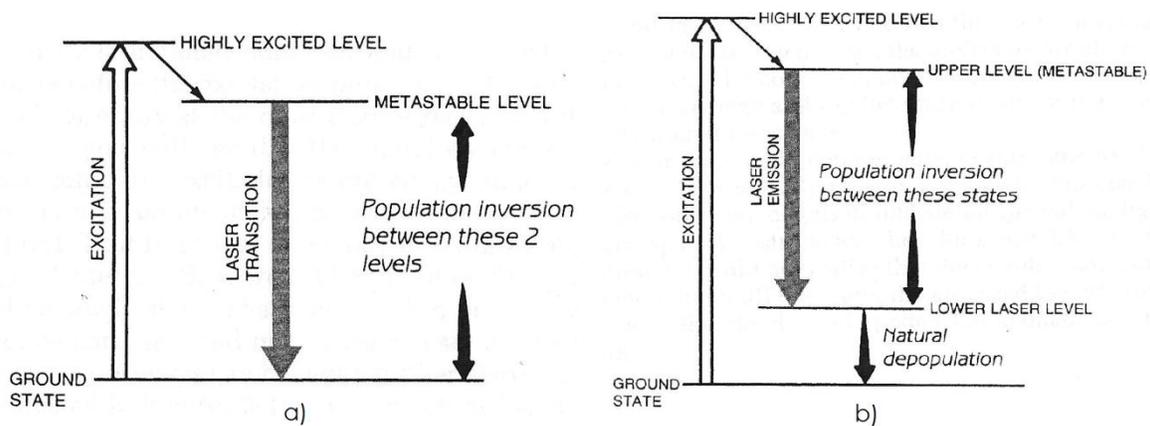
Generalmente para excitar a los átomos o moléculas de un láser se necesitan más de 2 pasos; lo ideal sería hacerlo en un estado o nivel metaestable. Nos referimos a nivel metaestable al nivel de energía que presenta un periodo de inversión de población muy alto; se llama metaestable dado que es estable en una escala atómica, es decir, milisegundos e incluso microsegundos. Un estado metaestable funciona mejor en los niveles láseres superiores, debido a que los átomos permanecen en ese estado el tiempo suficiente para producir una gran población en un nivel láser alto [1].

Existen láseres que realizan este proceso en 3 o 4 distintos niveles de energía. Los niveles de energía que manejan estos sistemas son los siguientes:

**3 niveles láser:** los átomos comienzan en el nivel fundamental de energía, que es el nivel láser más bajo. Posteriormente, una fuente externa excita los átomos a un nivel de energía de corta duración ligeramente superior al estado metaestable. Los átomos rápidamente liberan energía para llegar al estado metaestable, que es el nivel láser más alto. Este proceso una gran población en el estado metaestable, creando una población inversa entre ese nivel y el inferior que sigue, lo que permite que ocurra la emisión estimulada. Un ejemplo de este tipo de láseres es el primero que se creó, el de rubí [1].

**4 niveles láser:** El proceso es similar que en los láseres de 3 niveles, los átomos son excitados por una fuente externa y llevados a un nivel superior que el estado metaestable. Los átomos liberan energía para pasar al estado metaestable. Se produce la inversión de población entre el nivel metaestable y el siguiente nivel más bajo de energía, cabe mencionar que este nivel es superior al estado fundamental, a diferencia que en los láseres de 3 estados, en donde dicho nivel es casi el del estado fundamental de energía [1].

En la siguiente figura se muestra una comparación entre los sistemas de 3 o 4 niveles láser.



**Fig.2.3-Sistemas láser de 3 niveles (a) y de 4 niveles (b).**

Como podemos observar, la diferencia radica en el nivel bajo de energía que manejan, esto es muy importante por el hecho de que en los láseres de 3 niveles de energía, los átomos llegan al estado fundamental, por lo que necesitarán más energía para que sean excitados nuevamente.

Esto también tiene una gran importancia en la manera de operar del láser. Podemos tener un láser con un haz continuo cuando el nivel bajo de energía del láser tiene una duración corta y el estado metaestable sufre una despoblación debido a la transición entre los dos niveles de energía. También podemos tener un láser con operación por pulsos cuando los átomos se acumulan en el nivel bajo de energía [1].

Actualmente, los sistemas láser son más complejos, es decir manejan más niveles de energía, con lo que se mejora la eficiencia del láser [1]. Esta no es la única manera de aumentar la eficiencia, otra forma es agregar otro elemento a la sustancia que emite los fotones [1].

Para facilitar la excitación de los átomos en un láser, se utiliza una cavidad resonante, en donde los fotones liberados por la emisión estimulada quedan atrapados entre espejos reflectores, que se localizan en los extremos de la cavidad resonante, dichos espejos fuerzan a los fotones a viajar hacia adelante y atrás dentro de la cavidad resonante, cuando estos fotones pasan por otra partícula excitada con la misma energía, esta segunda partícula liberará un fotón que será de la misma longitud de onda, fase y dirección de desplazamiento que el primero, de esta manera se van excitando más partículas y va aumentando la cantidad de fotones entre los espejos. Si un espejo es parcialmente transparente se emite un haz de luz coherente, intenso y altamente ordenado [2]. Posteriormente trataremos algunas de las características de la luz láser.

## 2.2 Partes principales de un Láser

Las partes fundamentales de un láser son 3, la sustancia emisora, fuente de energía y el resonador óptico.

- **La sustancia emisora:** es la que proporciona los átomos, iones o moléculas que producen la amplificación de la luz. Esta sustancia debe ser altamente excitable para que pueda producirse la inversión de población.
- **Resonador óptico:** facilita la retroalimentación de la luz que se amplifica.
- **Fuente de energía:** es la encargada de excitar a la sustancia emisora. También recibe el nombre de resonador láser y cavidad láser.

A continuación se explicará con más detalle los principales elementos de un láser.

### 2.2.1 Sustancia Emisora

Como sabemos existen diversos materiales que nos pueden servir como sustancia emisora en un láser. Por otra parte, podemos clasificar los láseres de diferentes maneras, una de las principales formas es por el estado físico de la sustancia emisora que contiene. Mediante este principio podemos encontrar tres grandes grupos de láseres, los de estado sólido, de estado gaseoso y semiconductores.

En los *láseres de estado sólido*, existen dos tipos de materiales que participan directamente en la función del láser, el material huésped y la sustancia emisora. La sustancia emisora se encuentra dispersa en el material huésped, el cual puede encontrarse en forma de barra o a veces de lámina dentro del láser. La sustancia emisora será la que determine el modo de transición del láser; por otra parte, la interacción con el material huésped afectará la longitud de onda a la que operará el láser [2].

El material huésped debe cumplir con estrictos requisitos ópticos, térmicos y mecánicos, por ejemplo el ser transparente a la luz de la fuente excitadora y absorber poca luz a la longitud de onda del láser. En general existen dos tipos de materiales huésped, los cristales y los vidrios; los cristales son más eficientes disipando el calor residual, que se genera

con la luz de la fuente excitadora que no es absorbida por la sustancia activa; sin embargo, los cristales no pueden fabricarse en longitudes muy largas. Los vidrios son menos eficientes disipando el calor dentro del láser pero se pueden fabricar de manera más sencilla y en el caso de las fibras ópticas, el calor no resulta un problema debido a que tienen una gran superficie y un volumen pequeño [1].

Las principales sustancias emisoras, o las más utilizadas encontramos al cromo, neodimio, erbio, iterbio y titanio [1].

Los *láseres semiconductores* en su mayoría son de silicio aunque también se forman de compuestos con propiedades de semiconductor, éstos pueden ser de tipo orgánico e inorgánico. Los compuestos semiconductores orgánicos tienen como ventaja un proceso de fabricación más fácil y que no requiere una tecnología avanzada, entre estos tenemos compuestos de moléculas pequeñas y algunos polímeros.

Los compuestos semiconductores inorgánicos son formados por los siguientes elementos: aluminio, indio, galio, nitrógeno, fósforo, arsénico, estaño, antimonio, zinc, cadmio, mercurio, plomo, oxígeno, azufre, selenio y telurio [1].

La sustancia emisora de los *láseres de estado gaseoso* se divide en 3 principales grupos:

- **Gases atómicos:** formados por gases de átomos ionizados o neutros, que típicamente el haz láser que emiten se encuentra en el ultravioleta cercano. Ejemplos; láseres de argón y helio-neón.
- **Excímers:** este tipo de láseres emplea gases con moléculas diatómicas que se comportan de manera estable en el nivel de excitación más alto y se disocian en el nivel láser más bajo. El haz láser de dichos láseres emite luz ultravioleta. Ejemplos: láseres de cloruro de criptón y cloruro de xenón.
- **Gases moleculares:** utiliza gases con moléculas formadas de dos o más elementos. Pueden emitir en onda continua o pulsos en el infrarrojo cercano, medio y lejano. El láser más potente y comercial de este tipo es el de CO<sub>2</sub>.

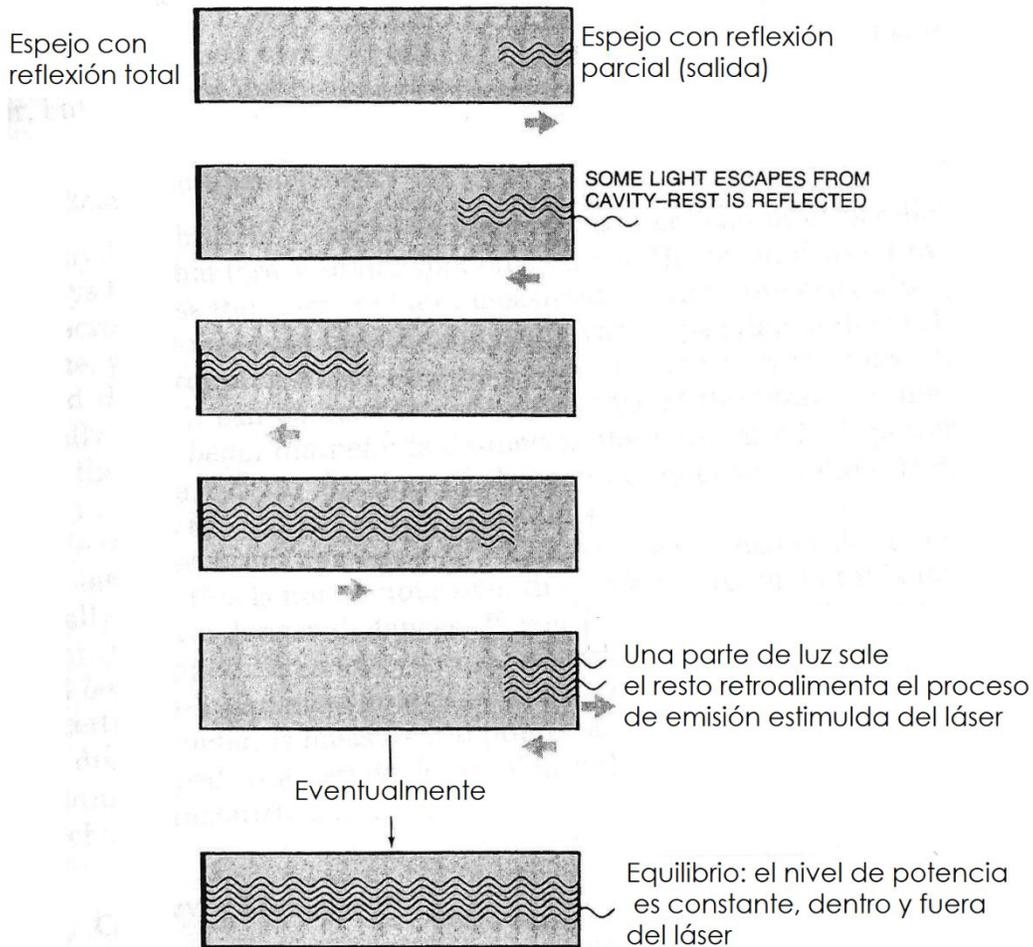
Muchos de estos láseres emplean otras sustancias ya sea para transmitir la energía de la fuente de excitación a la sustancia emisora o para disipar el calor residual. En el caso de láser de CO<sub>2</sub>, se emplea Nitrógeno para transferir la energía de la descarga eléctrica de la fuente al CO<sub>2</sub> y átomos de Helio para disipar el calor residual y para mantener la población inversa [3,4].

Existen otro tipo de láseres que no podemos incluir en alguna de las clases antes mencionadas, es el caso de los láseres de colorante sintonizable (*tunable dye lasers*, en inglés) que por lo general utilizan colorantes orgánicos de moléculas grandes, complejas y fluorescentes con un espectro complejo, que se disuelven en disolventes líquidos; la gran limitación de estos colorantes orgánicos es su alta degradación [1].

### 2.2.2 Resonador Óptico

La cavidad resonante consta de dos espejos colocados en los extremos del tubo que contiene la sustancia emisora. Estos espejos no son iguales, uno de ellos debe permitir el paso de un porcentaje de la luz que se encuentra dentro de la cavidad láser o resonante [2]. Normalmente el otro espejo refleja toda la luz que llega a él, sin embargo, en algunos casos este espejo deja pasar una parte de la luz para fines de monitoreo [1].

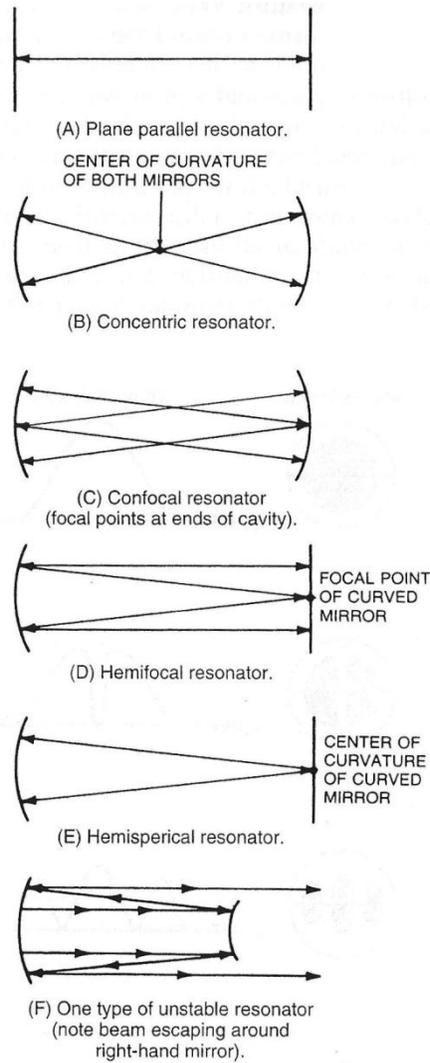
En la siguiente figura se muestra una ilustración de la emisión estimulada dentro de una cavidad resonadora.



**Fig.2.4-Emisión estimulada dentro del resonador óptico**

Respecto a la forma de los espejos dentro de la cavidad resonante, podríamos pensar que deben ser planos y estar colocados uno enfrente del otro como en el caso de un resonador de Fabry-Perot. Este tipo de resonador aunque parece muy simple, puede presentar problemas en cavidades láser largas y ganancia baja, debido a leves desajustes en los espejos que pueden provocar que los fotones que se reflejan de un espejo se pierdan en el desajuste entre los espejos [1].

Las pérdidas por desajustes en los espejos pueden ser combatidas usando uno o dos espejos curvos. Las configuraciones con espejos curvos que reflejan la luz hacia el otro espejo son llamados "resonadores estables." Existen otro tipo de configuraciones llamadas "resonadores inestables" en donde los rayos de luz, que están siendo reflejados por dichos espejos, eventualmente salen de la cavidad ocasionando pérdidas, por este motivo son usadas en láseres con ganancias altas en donde esta pérdida es aceptable [1]. En la siguiente figura se muestran diferentes arreglos.



**Fig.2.5-Arreglos diferentes de cavidades ópticas**

Cabe mencionar que los láseres con una ganancia baja requieren espejos con una alta capacidad de reflexión y con pérdidas pequeñas para mantener la oscilación de la luz dentro de la cavidad para que la luz sea reflejada al menos durante 20 veces antes de salir del láser. Por el contrario, los láseres de ganancias altas tienen espejos menos reflejantes, dado que el promedio de fotones debe ser reflejado al menos un par de veces antes de que sean emitidos [1].

### 2.2.3 Fuente de Energía

Existen 3 formas principales de excitar los átomos o moléculas de un láser, las cuales son bombeo óptico, excitación eléctrica de láseres de gas y excitación láser de diodos láseres semiconductores.

- **Bombeo óptico:** esta técnica utiliza los fotones para excitar átomos o moléculas a un determinado nivel de energía. La idea es excitar a la sustancia emisora del láser al estado metaestable por medio de la luz ya sea de una lámparas de destellos, una lámparas de arco o un diodo láser; actualmente se han sustituido las lámparas por un diodo láser, el cual presenta un ancho de banda más angosto, por lo que no se tienen tantas longitudes de onda parásitas, es decir, son más eficientes. Este tipo de excitación se puede usar en cualquier material que permita la excitación de la sustancia emisora a través de la luz de dicha fuente, tal es el caso de los láseres de estado sólido [1].

- **Excitación eléctrica de láseres de gas:** en esta técnica el paso de electrones con alto voltaje excitan al gas dentro de la cavidad láser llevándolo al estado metaestable. Cabe mencionar que este tipo de excitación se puede hacer de forma continua o en pulsos [1].
- **Excitación eléctrica de diodos láser semiconductores:** Los láseres semiconductores actúan como diodos, por tanto el paso de una corriente a través de dos regiones con composición diferente ocasionan una población inversa. En esta técnica lo que excita al láser son portadores de corriente, dado que son electrones y huecos los que producen la inversión de población.
- **Otras técnicas de excitación:** Algunos materiales láser son excitados de diferentes formas, por ejemplo con la rápida expansión de un gas caliente en una región fría puede producir una población inversa en un láser dinámico de gas. Por medio de reacciones químicas también podemos llevar a un estado metaestable un material.

## 2.3 Propiedades del haz láser

La importancia de los láseres, en gran parte, se debe a las propiedades que se pueden encontrar en un haz láser, las cuales son cruciales para la aplicación que se le dará al láser. Entre las principales características podemos encontrar:

- Longitud de onda
- Potencia del haz
- Variación de la potencia del haz en el tiempo
- Divergencia y tamaño del haz
- Coherencia
- Eficiencia

### 2.3.1 Longitud de Onda

La longitud de onda de un láser depende de dos factores principalmente, el material del láser y el diseño de la cavidad láser [1]; en el caso de láseres de estado sólido, la longitud de onda se puede ver afectada un poco por la interacción de la sustancia emisora con el material huésped [1]. En nuestro caso, como se trabajará con un láser de alta potencia de CO<sub>2</sub> la longitud de onda se encuentra en el rango de 9000 – 11000 [nm] [1]. Muchos láseres son llamados monocromáticos y actualmente emiten en un rango estrecho de longitudes de onda en un momento dado [1].

### 2.3.2 Potencia del Haz

La potencia del haz mide la cantidad de energía que el haz láser emite por unidad de tiempo, la cual se mide en Watts y se determina con la siguiente fórmula:

$$Potencia = \frac{\Delta \text{energía}}{\Delta \text{tiempo}} \quad (2.2)$$

Cabe mencionar que dicha potencia es la de todo el haz láser, no es la potencia por unidad de área. Una de las características del láser es que concentra la energía en un área pequeña por lo cual puede producir grandes potencias por unidad de área [1].

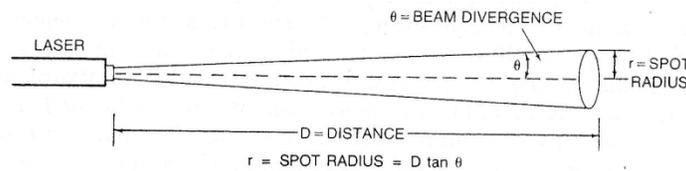
### 2.3.3 Variación de la potencia del haz en el tiempo

Los láseres pueden producir pulsos o haces continuos, aunque existen algunos láseres que solo producen pulsos. La longitud de dichos pulsos típicamente varía desde los milisegundos hasta los femtosegundo y son repetidos en un ritmo constante que puede variar desde uno por segundo hasta billones por segundo [1].

La potencia instantánea es el tipo de energía de emisión que aumenta y disminuye durante un pulso. Los pulsos cortos concentran la energía en el tiempo, por lo que el pico de potencia en un pulso puede ser muy alto aunque la cantidad total de energía sea pequeña [1]. Existen láseres que inherentemente operan en modo de pulsos, sin embargo otros son modulados ya sea externamente o internamente para producir pulsos con características deseadas [1].

### 2.3.4 Divergencia y Tamaño del Haz

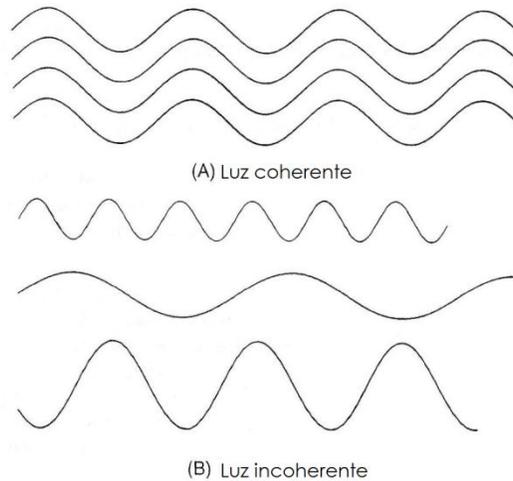
La divergencia del haz depende principalmente del tipo de láser, por ejemplo, los láseres semiconductores son los que presentan una divergencia mayor. Este factor debe tomarse en cuenta para aplicaciones en donde el haz láser recorrer grandes distancias. La divergencia del haz láser por lo regular se mide en miliradianes [1].



**Fig.2.6-Divergencia del haz láser**

### 2.3.5 Coherencia

Las ondas de luz son coherentes si están en fase unas con otras. En la siguiente figura se muestra una comparación entre luz coherente e incoherente.



**Fig.2.7- Comparación de luz coherente (a) e incoherente (b)**

La coherencia de la luz láser es relacionada con el estrecho rango de longitudes de onda emitidas. Cuanto más monocromática es la luz, más coherente es y a pesar de las largas distancias que debe recorrer permanecerá en fase. Los láseres son las únicas fuentes que pueden generar fácilmente luz coherente por distancias relativamente largas.

### 2.3.6 Eficiencia

La eficiencia en un láser se refiere a la cantidad de energía de entrada que puede convertir el láser en el haz de salida. Este parámetro varía extensamente y es un factor importante para elegir el tipo de aplicación que se le dará al láser. Los

tipos de láseres menos eficientes pueden convertir solo el 0.001% de la energía de entrada en el haz de salida [1]. El láser de CO<sub>2</sub> utilizado para este trabajo tiene una eficiencia de aproximadamente de 25%.

## 2.4 Aplicaciones de los Láseres

El desarrollo de nuevos láseres o incluso la optimización de los mismos se debe a la gran cantidad de aplicaciones que se les puede dar. Desde su aparición hasta nuestros días, los láseres se han consolidado como herramientas fundamentales en algunos sectores de la industria, en la medicina, la investigación e incluso en nuestra vida diaria. En esta sección se hablará de algunas aplicaciones que tienen los láseres principalmente los de CO<sub>2</sub>.

Para hablar de las aplicaciones de los láseres, es conveniente dividirlos en aplicaciones industriales, que requieren de una potencia mayor, y otras aplicaciones donde la potencia no necesariamente es alta, incluso hay aplicaciones con las que convivimos diariamente.

### 2.4.1 Aplicaciones industriales

Con el desarrollo de los láseres la industria ha tenido un gran avance en sus sistemas y técnicas para el proceso de materiales. A partir de la década de los setentas, los láseres ya se consideraban una herramienta importante para el proceso de materiales, sin embargo, se comenzó a trabajar en la integración de los láseres a los sistemas industriales existentes. Actualmente existen sistemas en los que se tiene una computadora central que controla varias máquinas en donde se involucra el diseño del producto, la fabricación y la supervisión del mismo.

Algunas de las principales aplicaciones de los láseres en la industria son: tratamiento superficial de materiales, recubrimiento de materiales, corte de materiales, soldadura de materiales, perforado de materiales y marcaje de materiales.

#### 2.4.1.1 Tratamiento superficial de materiales

El tratamiento superficial de materiales se realiza con el objetivo de dotar a la superficie del material a tratar con propiedades que les ayuden a resistir la operación continua bajo ciertas circunstancias como alta presión, altas temperaturas, mayor resistencia para soportar cargas mecánicas elevadas o entornos químicamente agresivos [1, 4]. Este tipo de tratamiento se puede realizar con dos métodos, el endurecimiento térmico y la aleación superficial.

- **Endurecimiento térmico:** En este método el haz láser es utilizado como fuente de calor para elevar la temperatura del material, en la zona que se desea tratar, sin llegar a la temperatura de fusión o de evaporación. Con ese procedimiento se modifican las propiedades del material en esa zona [5]. Los materiales más tratados con este método son hierros fundidos y aceros [4].
- **Aleación superficial:** el proceso de aleación superficial consiste en colocar sobre la superficie del material base que se quiere modificar una capa del material que se desea alear con el material base que puede estar en forma de polvo, lámina o varilla; posteriormente, el haz láser calienta esa zona hasta fundir los materiales para su aleación. Actualmente este proceso es utilizado en la industria automotriz y biomédica [5].

En el tratamiento superficial de materiales se requiere una importante cantidad de energía durante un tiempo relativamente prolongado, lo que hace que el láser de CO<sub>2</sub> sea el más apropiado para esta aplicación [4]. A mediados de los años noventa, el láser de CO<sub>2</sub> era el más usado para estos fines, pero actualmente también se utilizan los láseres de Nd:YAG [1, 5], diodos láser [5] y algunos láseres exímer [1].

#### 2.4.1.2 Recubrimiento de materiales

Este proceso es muy parecido a la aleación superficial; la diferencia entre dichos procesos es principalmente que en la aleación se busca fundir los dos materiales para que se forme una aleación y en el recubrimiento de materiales solo se

busca fundir el material del recubrimiento y calentar la menor cantidad del material base para que no se mezclen y simplemente se forme el recubrimiento del material base [5].

Las principales aplicaciones de este proceso se encuentran principalmente en las industrias automotriz, aeroespacial, de maquinaria y petroquímica [5]. Los láseres más usados son nuevamente los de CO<sub>2</sub> y los de Nd:YAG en modo continuo y de pulsos[5], actualmente se ha incrementado el uso de diodos láser para llevar a cabo este proceso [1].

### 2.4.1.3 Corte de materiales

El proceso de corte con láser se realiza mediante la evaporación del material a lo largo de la zona de corte. En este proceso se requieren 4 elementos fundamentales:

- **Mesa de coordenadas o robot industrial:** en general estos dos mecanismos se encargan del movimiento de la pieza o del haz láser por medio de control numérico [4,5].
- **Boquilla:** este dispositivo contiene en su interior un sistema de enfoque formado por un espejo y un lente; además cuenta con una entrada para el gas de aporte y una válvula por donde es expulsado este gas [4].
- **Gas de aporte:** es el encargado de proteger el sistema de enfoque, la eliminación del material fundido y por tanto reducir la absorción de energía por la nube del vapor de material que se genera con este proceso [4,5].
- **Láser:** es una parte fundamental del sistema. Debe cumplir con requisitos como poder generar la potencia necesaria para evaporar el material, además considerar la cantidad de energía absorbida por el material a la longitud de onda de operación del haz láser [1, 4].

En este proceso se utilizan láseres de CO<sub>2</sub> principalmente, a pesar de que los metales reflejan una gran cantidad de energía en la longitud de onda de operación de estos láseres, se compensa con las potencias que se pueden obtener con estos láseres así como las grandes densidades de potencia que se tiene enfocando el haz láser [4]. Los materiales más tratados con este método de corte son metales como el cobre, aluminio, plomo, zinc, bronce, titanio, etc. que se emplean principalmente en la industria automotriz [4, 5]. En la industria textil también se utiliza este método de corte para telas porque representa ciertas ventajas como el hecho de que no se maltratan las telas [4]. Otros materiales que son procesados con este método de corte son cerámicas, polímeros, madera y plásticos [4].

A continuación se muestran algunas imágenes de materiales procesados por láseres marca Synrad [7]

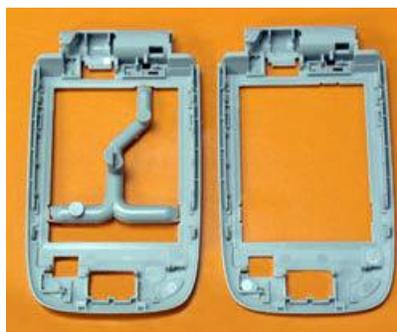


Fig. 2.8 –Corte de policarbonato con un láser de CO<sub>2</sub>



a)



b)

**Fig.2.9- a) Corte de TPO con un láser Synrad de CO2 de 400 W, b) Corte de acero con un láser de CO2 Firestar f400 de la marca Synrad**

#### **2.4.1.4 Soldadura de materiales**

Existen 2 tipos de soldadura láser de metales: la soldadura limitada por conducción y la soldadura de penetración en profundidad [4, 5].

- **Soldadura limitada por conducción:** Este tipo de soldadura utiliza el haz láser para fundir el material y crear una unión sin vaporización significativa del material [5]; en este proceso no necesita una densidad de potencia muy grande, por tal motivo se puede utilizar un láser sin enfoque o uno de menor potencia [4]. Este tipo de soldadura puede realizarse de 3 diferentes formas, soldadura por conducción, soldering y brazing. La primera técnica consiste en calentar el material por medio del haz láser y transmitir el calor al resto del material por medio de la conducción de calor; esta técnica se subdivide en dos modos, por calentamiento directo y por transmisión de energía [5]. El principio de soldering y brazing es similar, en ambos se utiliza un material de relleno entre las dos piezas que se unirán; el material de relleno es fundido por el haz láser y depositado entre las dos piezas. La diferencia entre estas dos técnicas consiste en la temperatura a la que se eleva el material de relleno; en el caso de soldering es menor a 450°C y en brazing es mayor a esa temperatura [5].
- **Soldadura por penetración en profundidad:** consiste en proporcionar una densidad de potencia capaz de evaporar una parte del material y conseguir un cilindro hueco que recibe el nombre de keyhole; el keyhole se llena de vapor ionizado del metal que es capaz de absorber el 95% de la energía del haz láser. La transmisión del calor al resto del material forma una zona de material fundido alrededor del keyhole; al mover el láser en la dirección de la soldadura el keyhole se traslada siguiendo el movimiento del láser y los huecos que van quedando se rellenan con material fundido que proviene de la zona que se aleja del haz láser [4, 6].

La soldadura de materiales no metales por láser tiene también un gran uso en la industria, por ejemplo en la industria de la electrónica, se aplica en soldaduras vidrio-metal o componentes que se deterioran con gran facilidad con el calor, así como en el sellado de componentes electrónicos y para soldar paquetes planos de circuitos integrados impresos sobre tablilla [4]. Los plásticos son fáciles de cortar por medio de un láser pero la soldadura de éstos se encuentra muy limitada por su bajo coeficiente de conductividad [4, 5].



Fig. 2.10 –Soldadura de acero inoxidable con un láser de CO<sub>2</sub> de la marca Synrad

#### 2.4.1.5 Perforado de materiales

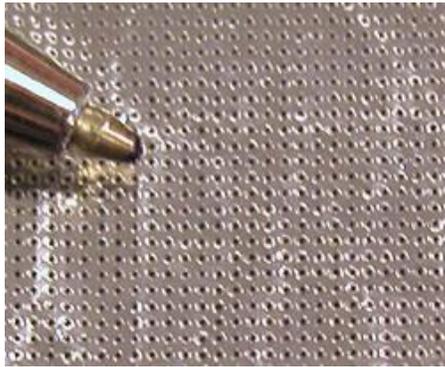
Esta aplicación es la más antiguas que han tenido los láseres desde su aparición, en la década de los sesentas se utilizaba un láser de rubí para perforar troqueles de diamante para trefilar alambres [4].

Existen diferentes técnicas de perforación con láser en donde el perforado se obtiene por vaporización, fusión o una combinación de ambos, estas técnicas dependen del material a procesar; por ejemplo, en el caso de metales la perforación se lleva a cabo por la eliminación de material en forma de líquido y gas con ayuda de un gas de aporte [4, 5].

La obtención de los agujeros en el material se puede realizar por dos métodos:

- **Perforado centrado o por percusión:** En este método el haz láser y la pieza de trabajo permanecen fijos durante el proceso; este proceso puede realizarse en un solo pulso del láser (en materiales de poco espesor) o en varios pulsos (para materiales de espesores mayores). El tamaño del agujero que se obtiene está directamente relacionado con el diámetro del haz focalizado [4].
- **Perforado en círculo o trepanado:** consiste en la eliminación del material siguiendo la trayectoria de un espiral que comienza en el centro del agujero y se expande hasta obtener el diámetro deseado. Cabe mencionar que este método se utiliza para agujeros de diámetros mayores, donde el método anterior pierde su utilidad [4].

La perforación de materiales se utiliza en materiales que requieren de una importante cantidad de energía, como el caso de metales usados en la industria automotriz, hasta aplicaciones en donde la potencia requerida no es tan grande, como la perforación de agujeros de ventilación en los papeles para cigarro [1, 5]. En general este es un proceso bastante usado en la industria, principalmente en la automotriz, aeroespacial, biomédica y eléctrica principalmente [5]. Los láseres más utilizados en este tipo de aplicación son los de CO<sub>2</sub>, los de Nd:YAG y los eximer [1, 4, 5].



a)



B)

Fig. 2.11 – a) Perforado de aluminio con un láser de CO<sub>2</sub> marca Synrad, b) Perforado de burletes de goma con un láser Synrad Firestar f201

#### 2.4.1.6 Marcaje de materiales

El marcaje de materiales es una de las aplicaciones del láser que se dieron en la década de los sesentas. Actualmente es una de las técnicas más usadas en la industria, desplazando a varias técnicas por las ventajas que ofrece como el marcar mensajes permanentes directo en productos ya terminados, sin emplear herramientas u otro tipo de proceso posterior al fijado; además no introduce ningún material adicional [4].

En este proceso el haz láser es enfocado y dirigido sobre el material usando espejos controlados computacionalmente. Este proceso de materiales puede realizarse de 5 maneras diferentes: formación de espuma y microfisuración, decoloración, blanqueamiento, grabado y ablación [5].

- **Formación de espuma y microfisuración:** la formación de espuma implica generar burbujas de gas en la superficie del material a temperaturas bajas, con las burbujas se tiene el contraste entre la marca y la superficie del material. Esta técnica por lo regular se utiliza para el tratamiento de polímeros.
- **Decoloración:** este proceso ocurre cuando el haz láser es absorbido, aumentando la temperatura del material hasta que se induce una degradación en el material. Este tratamiento es muy usado en polímeros y maderas.
- **Blanqueamiento:** los pigmentos en algunos polímeros pueden cambiar por medio de una reacción fotoquímica, ocasionada por la radiación de luz con una longitud de onda suficientemente pequeña que disocia las moléculas del pigmento y provoca el cambio de color. Los láseres más usados en este proceso son los eximer.
- **Grabado:** este proceso incluye la fusión o vaporización de la superficie del material en ciertas zonas, típicamente a una profundidad de 0.1 mm. La marca se forma por el contraste de las diferentes propiedades ópticas del material resolidificado y de la superficie del material que no se trató con el haz láser. Por lo regular, este proceso se utiliza para grabar termoplásticos utilizando un láser de CO<sub>2</sub>.
- **Ablación:** el marcaje de material por este proceso se lleva a cabo de la manera siguiente, la región de la superficie de material, en donde se colocará la marca, debe ser removido elevando su temperatura por encima de su punto de evaporación. Esta técnica es usada en materiales homogéneos, donde la marca se observa por el contraste entre la superficie del material y la región de material removida.



Fig. 2.12 –Marcaje de corcho con un láser Synrad de CO2 de 10W

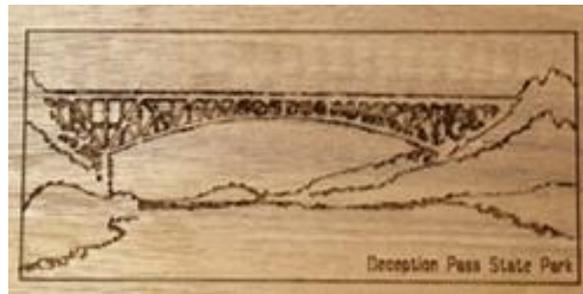


Fig. 2.13 –Grabado de madera con un láser Synrad de CO2 de 30W

## 2.4.2 Otras aplicaciones

Al existir una gran gama de láseres también existen variadas aplicaciones que se les puede dar en diferentes aspectos como en la industria, en campos como la medicina, la investigación y hasta en el entretenimiento. Si lugar a dudas, el tipo de láser más vendido en los últimos años es el diodo láser, principalmente utilizado en equipos lectores de DVD [1]. Sin embargo, en los últimos años se han comenzado a utilizar láseres de CO2, principalmente, para procesos de manufactura avanzada; por ejemplo, la fabricación de rejillas de periodo largo en fibra óptica (mencionada en el capítulo 1), acopladores para fibra óptica y como herramienta para la fabricación de celdas solares de bajo costo, por mencionar algunos [7].

## Conclusiones

Como hemos visto a través de este capítulo, los láseres han tenido un desarrollo importante debido al gran número de aplicaciones que se les ha dado con el tiempo. Los beneficios de usar láseres respecto a otras fuentes de luz han hecho que estos dispositivos se vuelvan una parte importante en la industria; dado que, presentan ventajas como el poder enfocar el haz láser en pequeños puntos consiguiendo densidades de potencia muy grandes o emitir en un rango pequeño de longitudes de onda, además de la obtención de luz coherente.

El gran número de aplicaciones de los láseres han motivado a los investigadores a trabajar en el desarrollo de más láseres o de hacer más eficientes los que ya se conocen, así como bajar los precios y modificar el tamaño de los mismos para poder manipularlos con mayor facilidad. El láser de CO2 ha sido uno de los láseres que más se han empleado en aplicaciones industriales, por las ventajas de potencia y longitud de onda de operación, principalmente en el procesamiento de materiales.

# CAPÍTULO 3. MODELO MATEMÁTICO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA FIBRA ÓPTICA POR EL HAZ LÁSER CO<sub>2</sub>

## Introducción

Actualmente existen diferentes técnicas para la fabricación de rejillas de periodo largo; sin embargo, en lo relacionado a la técnica de grabado punto a punto con un láser enfocado de CO<sub>2</sub> aún no existe algún modelo matemático que permita calcular o aproximar el tiempo de exposición de la fibra ante el haz láser y la potencia del mismo para la fabricación de las RPL en fibra óptica. Por el motivo anterior, en este trabajo se desarrolló un modelo matemático del proceso de tratamiento térmico de la fibra óptica por medio del haz láser CO<sub>2</sub> que realiza la evaluación de los factores que interactúan en el proceso de grabado de las RPL en fibra óptica y nos permite calcular los valores de parámetros como el tiempo de exposición de la fibra y la potencia del haz láser, entre otros [1, 2, 3, 4, 5, 6].

En esta sección se presentará el desarrollo del modelo matemático del tratamiento térmico de la fibra óptica por medio del haz láser de CO<sub>2</sub> que toma en cuenta las singularidades del proceso de grabado de las RPL en fibras ópticas por medio de la técnica de grabado punto a punto con un láser enfocado.

### 3.1 Modelos matemáticos existentes

Al realizar la revisión del estado del arte de la fabricación de RPL en fibra óptica, nos encontramos con el hecho de que en los artículos relacionados a la fabricación de RPL en fibra óptica, específicamente usando la técnica de grabado punto a punto, solo mencionan el tipo de láser usado, el tiempo que se expuso la fibra óptica ante el haz láser, el tipo de fibra y si ésta fue tensada con cierto peso; sin embargo, no se menciona la existencia o realización de modelos matemáticos para el cálculo de los parámetros que influyen en la fabricación de estos dispositivos. Lo mencionado anteriormente fue el motivo por el cual decidimos trabajar en la elaboración de un modelo matemático que nos ayudara a calcular parámetros como el tiempo de exposición de la fibra óptica y la potencia del láser para la fabricación de RPL en fibra óptica por medio de la técnica de grabado punto a punto con un láser enfocado de CO<sub>2</sub>.

En el desarrollo del modelo matemático presentado en este trabajo, se tomaron en consideración algunos modelos matemáticos desarrollados para procesos de soldadura láser de diversos materiales. Cabe mencionar que en el área de procesamiento de materiales con láseres existen diferentes modelos matemáticos que se adaptan a ciertas técnicas de soldadura o corte de materiales, incluso existen simuladores para modelar el procesamiento de materiales con láseres, ya sean metales, plásticos o cerámicas. Las técnicas más comunes en soldadura de materiales son soldadura por arco, soldadura por haz de electrones, soldadura de estado sólido, soldadura por resistencia, soldadura láser por unión y soldadura láser por penetración en profundidad (*laser keyhole welding*) [7].

En la técnica de soldadura por penetración en profundidad las temperaturas alcanzadas son superiores a la temperatura de evaporación, dado que se busca formar el *keyhole* para obtener un cilindro con una zona de material fundido y otra zona con material evaporado. En modelos matemáticos de la técnica de soldadura por *keyhole* se realiza un análisis de cambio de fase física del material, debido a que éste pasa de estado sólido a líquido y después se convierte en gas. En este tipo de soldadura los modelos matemáticos consideran el efecto de calor latente; sin embargo, este estudio se torna un tanto complicado debido a que se estudian como partes separadas las zonas con material fundido y en forma de gas [8]. A continuación se muestra un ejemplo de modelo matemático usado para encontrar la potencia del haz láser para soldar dos piezas por medio de la técnica de *Keyhole*.

$$q = r_B lvL_v + \frac{l^2}{4} vL_m + \frac{2\pi\lambda l(T_m - T_0)}{\ln(8)} \quad (3.1)$$

Donde  $q$  es la potencia del haz láser, el *keyhole* como un cilindro de altura  $l$  y radio  $r_B$ . El área transversal de la zona con material fundido es  $l^2/4$ ,  $L_v$  es el calor latente volumétrico de vaporización,  $L_m$  es en calor latente volumétrico de fusión y  $v$  es la velocidad del haz láser.

Este tipo de modelos matemáticos no son de gran ayuda para nuestro trabajo, debido a que en la fabricación de RPL en fibra óptica no nos interesa el fenómeno de calor latente de fusión ni de evaporación. Durante el proceso de fabricación, a pesar de tomar como temperatura máxima la de fusión, nos interesa elevar la temperatura de la fibra hasta que sea suave y puedan formarse los elementos de las rejillas, es decir, no existe un cambio de estado físico de la materia por tal motivo revisaremos modelos matemáticos en donde no se considere el cambio de estado físico del material de la pieza de trabajo.

En la mayoría de artículos relacionados al modelado de soldadura láser, solo es considerado el efecto de conductividad térmica y la energía necesaria para el calentamiento de la pieza de trabajo como factores que interactúan en el proceso de soldadura por medio de láser; sin embargo, desprecian los efectos de radiación térmica y convección térmica [9-15]. Otro factor importante que es tomado en cuenta, en los modelos matemáticos de soldadura láser, es la velocidad con que se mueve el haz láser o la pieza de trabajo; en nuestro caso esta velocidad se considera como cero, porque en el proceso de fabricación de RPL en fibra óptica el haz del láser está enfocado en un punto de la fibra para poder formar un elemento de la rejilla, posteriormente se deja de aplicar el haz láser en ese punto para desplazar la fibra óptica, dependiendo el periodo de la misma, para formar otro elemento. Los modelos matemáticos de estos artículos siguen la expresión que a continuación se muestra:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = k \Delta T + \frac{1}{\rho c_p} Q(x, y) \delta(z) \quad (3.2)$$

Donde  $T$  es la temperatura,  $t$  el tiempo,  $U$  la velocidad del haz láser que se desplaza en el eje  $x$ ,  $k$  la difusividad térmica del material de la pieza de trabajo,  $\rho$  la densidad física del material,  $C_p$  el calor específico,  $Q$  la distribución de potencia por unidad de área y  $\delta(x)$  función delta.

En el modelo matemático del presente trabajo, se evaluarán los factores que interactúan en el proceso de fabricación de rejillas por la técnica de grabado punto a punto con un láser enfocado y se determinará si son factores contundentes que influyen en el proceso de grabado de rejillas, incluyendo los factores que en modelos de soldadura láser no se consideran importantes como radiación térmica y convección térmica.

## 3.2 Propiedades del Sílice

Antes de comenzar a explicar el modelo matemático desarrollado en este trabajo, mencionaremos algunas de las propiedades del sílice fundamentales en este modelo matemático, principalmente de las propiedades térmicas de este material. Estas propiedades son importantes en el proceso de calentamiento y fundición de la fibra óptica que se relaciona directamente con el proceso de grabado de rejillas en fibra óptica y con el modelo matemático del presente trabajo.

En el proceso de grabado de RPL en fibra óptica se han considerado en primer lugar las pérdidas por conducción térmica, convección térmica, radiación térmica, la potencia absorbida por la fibra óptica y la energía necesaria para elevar la temperatura de la fibra en contacto con el haz láser. Para el cálculo de esos efectos térmicos es necesario conocer los siguientes parámetros [8, 16-18].

**Tabla 3.1. Parámetros de sílice (SiO<sub>2</sub>) utilizados en los cálculos**

Densidad específica, $\rho$	2,700 kg/m <sup>3</sup>
Absorción, $\alpha$	0.7 @ $\lambda=10.6 \mu\text{m}$
Emisividad, $\varepsilon$	0.7 @ $\lambda=10.6 \mu\text{m}$
Calor específico, $c_p$	755 J/Kg K
Conductividad térmica, $k$	1.3 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> @ 300 K
Temperatura de ablandamiento, $T_s$	1938 K
Temperatura de fusión, $T_f$	2270 K

Sin embargo, existen coeficientes que no se encontraron en tablas pero que podemos conocer aplicando algunas fórmulas; por ejemplo, el coeficiente de absorción y el coeficiente de convección.

**Coefficiente de convección:** este coeficiente fue calculado a través de una aproximación descubierta en un proceso de soldadura láser, el cual considera que  $h=0.0024\varepsilon T^{1.61}$ , donde  $\varepsilon$  es el coeficiente de emisividad de la fibra y T es la temperatura de la fibra en grados Kelvin [15].

**Coefficiente de absorción del sílice:** Para calcular este coeficiente se utiliza la siguiente fórmula que fue tomada de la referencia [18], específicamente en la página 7, en que el coeficiente  $\alpha$  está dado por la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{4\pi x}{\lambda} = 4\pi x \nu \quad (3.3)$$

Donde  $x$  es un parámetro que se obtiene de tablas.

$\lambda$  es la longitud de onda expresada en [cm]

$\nu$  es el inverso de dicha longitud de onda [cm<sup>-1</sup>]

La longitud de onda que nos interesa es 10.6  $\mu\text{m}$ , expresada en centímetros es 0.00106 [cm] y su inverso es  $\nu= 1041.66$  [cm<sup>-1</sup>].

El valor de  $x$  para esta longitud de onda no se encuentra directamente en la tabla; por consiguiente lo aproximaremos realizando una interpolación lineal con los 2 valores cercanos a la longitud de onda de nuestro interés. Los valores son:

$\nu$	$x$
1015	2.74
1050	2.95

$$x = 2.74 + (1041.6 - 1015) \frac{(2.95 - 2.74)}{(1050 - 1015)} = 2.8996 \quad (3.4)$$

Al obtener el valor de  $x$  mediante la interpolación lineal ya podemos aplicar la fórmula para encontrar el coeficiente  $\alpha$

$$\alpha = 4\pi \nu x = 4 \times \pi \times 1041.6 \times 2.8996 = 35,955.53 \quad (3.5)$$

### 3.3 Modelo matemático básico del calentamiento de la fibra óptica de sílice por medio del haz láser de CO2

Los factores que consideramos participan en el proceso de fabricación de RPL en fibra óptica, se muestran a continuación:

- Energía necesaria para calentar la masa de fibra expuesta ante el haz láser.
- Pérdidas por conductividad térmica.
- Pérdidas por convección térmica (enfriamiento del aire).
- Pérdidas por radiación térmica del material de la fibra.
- Potencia absorbida.

Considerando los factores anteriores el modelo matemático propuesto presenta la siguiente forma:

$$P_a \times t = E + C_1 + C_2 + R \quad (3.6)$$

Donde  $P_a$  = potencia del haz láser absorbida por el material de la fibra

$t$  = tiempo de exposición de la fibra ante el haz láser

$E$  = energía necesaria para calentar la masa de fibra expuesta ante el haz

$C_1$  = Efecto de la conductividad del material de la fibra

$C_2$  = Convección del aire

$R$  = radiación térmica

A continuación, se tratarán por separado los factores que interactúan en el proceso de fabricación de RPL en fibra óptica considerados en el modelo matemático y se evaluarán los valores máximos que pueden tomar dichos factores para si la consideración de esos factores es determinante para el modelo matemático.

#### 3.3.1 Estimación de Energía necesaria para calentar la fibra expuesta al haz láser

La energía que se necesita para calentar la masa de la fibra expuesta al haz láser depende de las características térmicas del material de la fibra, en específico la capacidad calorífica específica del material. La capacidad calorífica de un material indica la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado centígrado una unidad de masa de ese material.

La cantidad de energía necesaria para elevar la sección de fibra óptica en contacto con el haz láser a la temperatura deseada se puede expresar de la manera siguiente:

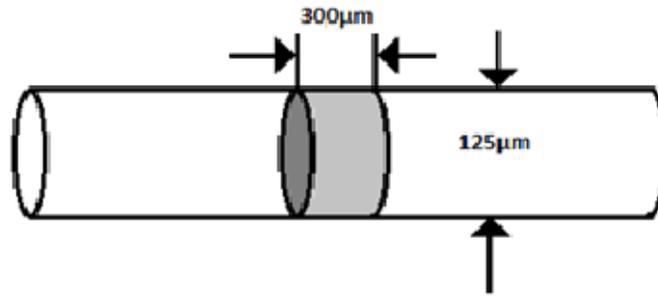
$$E = c_p \times m \times \Delta T \quad (3.7)$$

Donde  $C_p$  = es la capacidad calorífica específica del cuarzo [J/Kg K]

$\Delta T$  = diferencia entre la temperatura inicial (ambiente) y a la que se desea llegar [K]

$m$  = masa de fibra expuesta ante el haz láser [Kg]

Considerando la sección de la fibra que se encuentra en contacto con el haz láser como se muestra en la figura, es decir una sección cilíndrica con diámetro igual al de la fibra óptica que se utilizará y altura de 30 $\mu$ m.



**Fig. 3.1 Sección de la fibra óptica de 125μm de diámetro que se considera en contacto con el haz láser**

Para encontrar el valor de la masa de fibra que se pretende calentar multiplicaremos el volumen de la sección cilíndrica que se muestra en la figura 3.1 por la densidad del sílice.

$$V = \pi r^2 h = \pi \times 62.5^2 \times 300 = 368155.389 \mu m^3 = 3.68155 \times 10^{-12} m^3 \quad (3.8)$$

La masa de esa sección de fibra es la siguiente:

$$m = \rho V = 2200 \times 3.68155 \times 10^{-12} = 8.09941 \times 10^{-9} \quad (3.9)$$

La energía necesaria para elevar a la temperatura deseada la sección cilíndrica de la fibra óptica descrita anteriormente es

$$E = c_p \times m \times \Delta T = 755 \times 8.09941 \times 10^{-9} \times (2270 - 300) \quad (3.10)$$

$$E = 0.012 [W]$$

Realizando el mismo proceso para fibras de 200μm, 250μm y 400μm obtenemos la siguiente tabla

Diámetro de la fibra óptica [μm]	Energía para calentar la fibra óptica [W]
125	0.012
200	0.308
250	0.0482
400	0.1234

**Tabla 3.1. Energía necesaria para elevar la temperatura 4 fibras ópticas de diferentes diámetros**

### 3.3.2 Estimación del Efecto de Conducción Térmica

El efecto de Conducción se puede expresar de la siguiente forma [17]:

$$C_1 = \frac{(k \times A \times \Delta T)}{L} \quad (3.11)$$

K = coeficiente de conductividad térmica del cuarzo [W/m K]

A= al área transversal de la fibra en contacto con el haz láser [m<sup>2</sup>]

ΔT = diferencia entre la temperatura inicial (ambiente) a la que se desea llegar [K]

L = longitud de la fibra donde se transmite el calor [m]

La longitud de la fibra donde se transmite el calor será considerada como la profundidad a la que el calor del haz penetra. En los procesos de soldadura se utiliza una regla llamada del pulgar [8], la cual nos da la profundidad de penetración térmica dependiendo el tiempo de exposición del material ante el haz del láser. Esta regla es expresada con la siguiente fórmula

$$z = \sqrt{4at} \quad (3.12)$$

Donde  $z$ = profundidad de penetración térmica [m]

$a$ = difusividad térmica del material de la fibra óptica [ $m^2/s$ ]

$t$ = tiempo de calentamiento de la fibra óptica [s]

Sustituyendo  $L$  por  $z$ , el efecto de conductividad térmica queda expresado como

$$C_1 = \frac{(k \times A \times \Delta T)}{\sqrt{4at}} \quad (3.13)$$

Sustituyendo en la formula los valores máximos que deben tomar los parámetros que describen este efecto podemos evaluar si es indispensable incluirlo en el modelo matemático o si podemos despreciarlo. Los valores máximos que consideraremos son:

- La máxima penetración térmica que debemos tener en el proceso de fabricación de RPL en fibra óptica igual al diámetro de la fibra óptica
- La temperatura máxima de la fibra óptica es la temperatura de fusión, aproximadamente de 1715 [K]
- El coeficiente de conducción térmica de 2.5 [W/mK] para temperaturas de 1000°C
- $A$  es igual al área de la fibra óptica que es igual a  $(\text{diámetro de la fibra})^2 \cdot \pi$ .

Con los valores anteriores se obtiene que el efecto máximo de conductividad térmica para una fibra de 125 $\mu\text{m}$  es de  $C_1=0.10308$  [W]. Realizando el mismo procedimiento para los otros diámetros de las fibras tenemos la siguiente tabla:

Diámetro de la fibra óptica [ $\mu\text{m}$ ]	Efecto de conductividad térmica máximo [W]
125	0.0277
200	0.071
250	0.1109
400	0.284

**Tabla 3.2. Efecto de conductividad térmica en 4 fibra ópticas de diferente diámetro**

### 3.3.3 Estimación del Efecto de Convección Térmica

El efecto de convección térmica en este proceso lo podemos tomar en cuenta como el efecto de enfriamiento de la fibra a través del calentamiento del aire que se encuentra en contacto con la fibra óptica que es calentada con el haz láser. Este efecto sigue la fórmula [16, 17]:

$$C_2 = A_s \times h \times \Delta T \quad (3.14)$$

$A_s$  = superficie de la fibra en contacto con el aire [ $m^2$ ]

$h$  = coeficiente de convección de la fibra óptica [ $W/m^2 K$ ]

$\Delta T$  = diferencia entre la temperatura inicial (ambiente) a la que se desea llegar [K]

Ahora evaluaremos este efecto para los diferentes diámetros de fibra óptica considerando los valores máximos para los diferentes parámetros que interactúan en este fenómeno.

- Temperatura máxima igual a la de fusión del sílice
- Superficie de la fibra en contacto con el aire se tomará como la superficie de la sección cilíndrica descrita en la sección 3.3.1, solo se considerará esa sección dado que es la parte de la fibra óptica que se está calentando por el haz láser y por tanto es de nuestro interés para que se puedan grabar los elementos que formarán las RPL en fibra óptica. Esta área se obtiene considerando un rectángulo de base igual al perímetro de la fibra óptica y de altura igual al diámetro del haz láser.

Con los valores anteriores obtenemos los siguientes valores de convección térmica para los diferentes diámetros de fibra óptica que se han tomado como base en este trabajo.

Diámetro de la fibra óptica [ $\mu\text{m}$ ]	Efecto de convección térmica máxima [W]
125	0.272
200	0.4352
250	0.5441
400	0.8705

**Tabla 3.3. Efecto de convección térmica en 4 fibra ópticas de diferente diámetro**

### 3.3.4 Estimación del Efecto de Radiación Térmica

Finalmente el fenómeno de radiación podemos encontrarlo siguiendo la expresión que a continuación se describe [17]:

$$R = \sigma \times \varepsilon \times A_s \times T^4 \quad (3.15)$$

$\sigma$ = Constante de Stefan-Boltzman, que es igual a  $5.67 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]

$\varepsilon$ = Coeficiente de emisividad

$A_s$  = superficie de la fibra en contacto con el aire [m<sup>2</sup>]

$T^4$ = Temperatura de la fibra elevada a la cuarta potencia [K]

Como en los casos posteriores, evaluaremos la importancia de considerar este efecto en el modelo matemático para los 4 diámetros de fibra óptica. En este caso se tomarán los valores máximos que se han considerado en los casos anteriores:

- Temperatura máxima igual a la de fusión del sílice= 1715 [K]
- Superficie en contacto con el aire se considerará como un rectángulo de 30 $\mu\text{m}$  por el perímetro de la fibra óptica.

Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla, para los diferentes diámetros de fibra óptica

Diámetro de la fibra óptica [ $\mu\text{m}$ ]	Efecto de radiación térmica máximo [W]
125	52.7809
200	84.4494

250	105.5617
400	168.8988

Tabla 3.4. Efecto de radiación térmica en 4 fibra ópticas de diferente diámetro

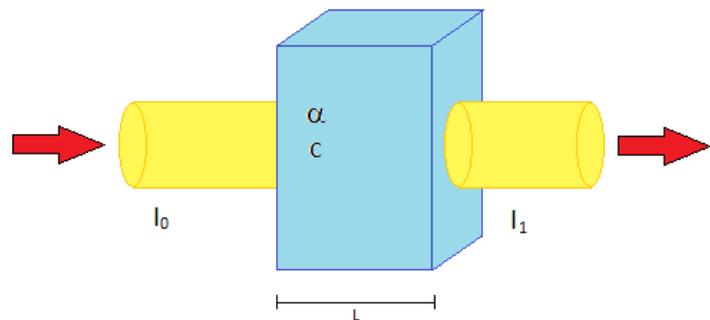
### 3.3.5 Estimación de la Potencia Absorbida

La luz láser que incide en la superficie de un material puede ser absorbida, reflejada, transmitida o re-irradiada. En general la absorción es la medida de la fracción de radiación incidente que es absorbida. Esta medida dependerá de las características del material y la interacción que tenga con el haz láser, en nuestro caso de la fibra óptica y de la frecuencia del haz láser de CO<sub>2</sub>.

El efecto de la potencia absorbida por el material está definido por la ley de Beer-Lambert, la cual relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción. La relación entre ambas intensidades puede expresarse a través de la siguiente relación:

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha l}$$

$\alpha$ = coeficiente de absorción  
 $l$ = longitud de la muestra en estudio



Donde  $I_1$  es la intensidad que atraviesa la muestra e  $I_0$  la intensidad incidente en dicha muestra. Cabe mencionar que la reflexión de luz depende de las propiedades de cada material y de la longitud de onda de la luz que se hace pasar por dicho material.

De acuerdo a la ley de Beer –Lambert, la luz que atraviesa la muestra de material se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$I_1 = I_0 \times e^{-\alpha l} \tag{3.16}$$

Por tanto la intensidad absorbida, A, podemos expresarla de la siguiente manera:

$$A = \frac{(I_0 - I_1)}{I_0} = 1 - e^{-\alpha l} \tag{3.17}$$

La potencia absorbida que utilizaremos en el modelo matemático está dada por la siguiente fórmula:

$$Pa = P (1 - e^{-\alpha L}) \tag{3.18}$$

Donde P es la potencia incidente en la fibra

Pa es la potencia que absorbe el material de la fibra

$\alpha$  es el coeficiente de absorción del material de la fibra

L es la longitud que debe atravesar el haz láser, el cual consideraremos igual al diámetro de la fibra expresado en centímetros

La potencia absorbida se obtiene a partir de la potencia que incide en nuestra fibra; sin embargo la potencia incidente no es la potencia total que nos da el haz laser, dado que una parte de la potencia total se refleja, para nuestro material de la fibra se consideró que la potencia reflejada es aproximadamente el 30% de la potencia total, este dato se obtuvo de la gráfica 6.11 en la página 110 de la referencia [18].

Con los datos que se mencionan en el apartado de las propiedades del sílice, finalmente podemos obtener la potencia absorbida por la fibra que servirá para calentar nuestro material.

$$P_a = (P \times 0.7)(1 - e^{-\alpha L}) \quad (3.19)$$

Donde P es la potencia a la salida del haz láser

$P_a$  es la potencia que absorbe el material de la fibra

$\alpha$  es el coeficiente de absorción del material de la fibra

L es la longitud que debe atravesar el haz láser, el cual consideraremos igual al diámetro de la fibra expresado en centímetros

### 3.3.6 Modelo matemático Final

Después de evaluar los factores que interactúan en el proceso de fabricación de RPL en fibra óptica considerados al principio de la sección y comparando lo obtenido con los modelos usados en soldadura láser, nos damos cuenta de que en el grabado de RPL en fibra óptica, al manejar dimensiones tan pequeñas, el efecto más importante es el de radiación; sin embargo, los efectos de conductividad y convección térmica son de mayor magnitud que la energía necesaria para elevar la temperatura de la sección de fibra óptica expuesta al haz láser.

En este modelo matemático se considerarán los factores de conducción térmica y la energía para elevar la temperatura de la fibra hasta que se encuentre suave y se puedan grabar los elementos de las RPL, estos factores son considerados en los modelos matemáticos de soldadura láser; sin embargo, en nuestro caso se incluirán los efectos de convección y radiación dado que los valores de estos efectos son mayores y no los podemos discriminar.

Con las consideraciones anteriores, el modelo matemático sigue la expresión original, es decir:

$$P_a \times t = E + C_1 + C_2 + R \quad (3.20)$$

Donde  $P_a$  = potencia del haz láser absorbida por el material de la fibra

t = tiempo de exposición de la fibra ante el haz láser

E = energía necesaria para calentar la masa de fibra expuesta ante el haz

$C_1$  = Efecto de la conductividad del material de la fibra

$C_2$  = Convección del aire

R = radiación térmica

Al realizar el análisis dimensional del modelo, nos encontramos con el hecho de que necesitamos relacionar de cierta manera los efectos de convección, conducción y radiación térmica con el tiempo. En los modelos matemáticos de soldadura láser, la dependencia del tiempo está dada por el parámetro  $\tau_0$  expresado con la siguiente formula [8, 9]:

$$\tau_0 = \frac{r_h^2}{4a} \quad (3.21)$$

Donde  $r_h$  = radio del haz láser [m]

$a$  = difusividad térmica del cuarzo [ $m^2/s$ ]

Agregando este parámetro de la dependencia del tiempo al efecto de conducción térmica, convección térmica y radiación térmica del modelo matemático, tomaría la siguiente forma

$$P_a \times t = E + (C_1 + C_2 + R) \times \tau_0 \quad (3.22)$$

Hasta el momento se ha considerado que la potencia que sale del láser llega completamente a la fibra; sin embargo, el sistema de enfoque refleja una porción de esa energía al igual que el tubo de descarga del láser. Primero encontraremos la porción de luz que es reflejada por el lente de ZnSe.

El índice de refracción del ZnSe para una frecuencia de  $10.6\mu m$  es de 2.4 [5 de láseres]. La reflectancia, es la propiedad que tiene un cuerpo de reflejar luz, depende de los índices de refracción del material, de la polarización de la luz y el ángulo de incidencia de la misma [19]. Si la luz incide perpendicularmente en la superficie del cuerpo, como es nuestro caso, la reflectancia puede expresarse de la siguiente forma:

$$R = \frac{\left(\frac{n_{mayor}}{n_{menor}} - 1\right)^2}{\left(\frac{n_{mayor}}{n_{menor}} + 1\right)^2} \quad (3.23)$$

El haz láser viaja del aire al lente de ZnSe, por tanto tomaremos el índice de refracción mayor como el del ZnSe y el menor como el del aire. Al aplicar la fórmula obtenemos

$$R = \frac{\left(\frac{2.4}{1} - 1\right)^2}{\left(\frac{2.4}{1} + 1\right)^2} = 0.16955 \quad (3.24)$$

Sin embargo debemos considerar que la luz es reflejada del aire al lente y del lente al aire nuevamente. En el caso de tener dos superficies planas, la reflectancia se puede encontrar con la siguiente fórmula

$$r = \frac{2R}{1 + R} = \frac{2 \times 0.16955}{1 + 0.16955} = 0.28994 \quad (3.25)$$

Obteniendo la reflexión que tenemos en el sistema óptico, podemos conocer la fracción de potencia que sale del sistema de enfoque y que realmente llega a la fibra óptica

$$t = 1 - r = 1 - 0.28994 = 0.710059 \approx 0.71 \quad (3.26)$$

Como anteriormente se mencionó, el espejo y la ventanilla del tubo de descarga del láser suman pérdidas de potencia; como no existe una medición exacta que nos determine que potencia se pierde en estos dos dispositivos, estimaremos que las pérdidas de potencia son, en el mejor caso de 0.1 y de 0.3 en el peor caso. Analizaremos los dos casos y utilizaremos el promedio de ambos.

- **Caso 1:** La potencia transmitida después de la ventanilla del tubo de descarga del espejo es de 0.9, es decir, se refleja 0.1 de la potencia. Después del lente se tiene una transmisión de 0.71; por tanto, la potencia transmitida será

$$Pt = 0.9 \times 0.71 = 0.639 \quad (3.27)$$

- **Caso 2:** La potencia transmitida después de la ventanilla del tubo de descarga del láser y del espejo es de 0.7, es decir, se refleja 0.3 de la potencia. Después de la lente se tiene una transmisión de 0.71; por tanto, la potencia transmitida será

$$Pt = 0.7 \times 0.71 = 0.497 \quad (3.28)$$

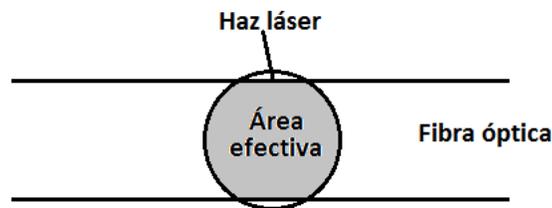
El promedio de esos dos valores es de  $\eta=0.568$ , por tanto consideraremos que la eficiencia de nuestro sistema es de 0.568. Considerando la eficiencia de nuestro sistema, el modelo matemático sería el siguiente:

$$P_a \times t \times \eta = E + (C_1 + C_2 + R) \times \tau_0 \quad (3.29)$$

Se ha considerado hasta el momento la eficiencia del sistema óptico formado por la ventanilla del tubo de descarga del láser por donde sale el haz del láser, el espejo y el lente del sistema de enfoque. Ahora debemos considerar el factor geométrico del área del haz con el de la fibra óptica iluminada por el haz, el cual es expresado de la siguiente forma:

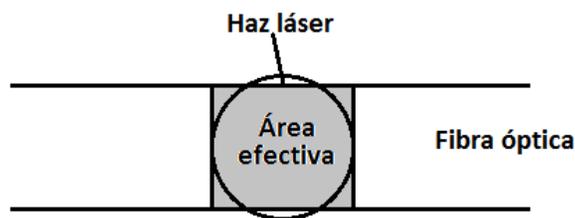
$$Fg = \frac{A_h}{A_{ef}} \quad (3.30)$$

En la siguiente figura se ilustran el área efectiva de la fibra óptica que es iluminada por el haz láser y el área del haz láser.



**Fig.3.2. Geometría del problema**

Para fines más prácticos aproximaremos el área efectiva de la fibra óptica considerándola como un rectángulo con las siguientes dimensiones



**Fig. 3.3. Aproximación del área efectiva de la fibra óptica en contacto con el haz láser**

El factor geométrico es expresado de la siguiente forma considerando las áreas descritas en la figura anterior

$$Fg = \frac{A_h}{A_{ef}} = \frac{A_h}{d_f d_h} \quad (3.31)$$

Donde  $d_f$  es el diámetro de la fibra óptica  
 $d_h$  el diámetro del haz láser

Una vez consideradas las pérdidas en el sistema, el modelo matemático toma la siguiente forma:

$$P_a \times t \times \eta \times F_g = E + (C_1 + C_2 + R) \times \tau_0 \quad (3.32)$$

Con la obtención del modelo matemático (3.32) y considerando todos los factores significativos que interactúan en el proceso de fabricación de RPL en fibra óptica, podemos evaluar el comportamiento de la temperatura en relación con el tiempo y la potencia. Para realizar este análisis se elaboró un programa en MATLAB en donde se varía la temperatura y la potencia para obtener el tiempo de exposición de la fibra óptica ante el haz láser para grabar los elementos de la RPL.

El código del programa de cálculo realizado para el análisis del comportamiento de la temperatura absoluta, T, contra el tiempo, t, con parámetros: la potencia del haz láser y el diámetro de la fibra óptica se anexa en el apéndice A

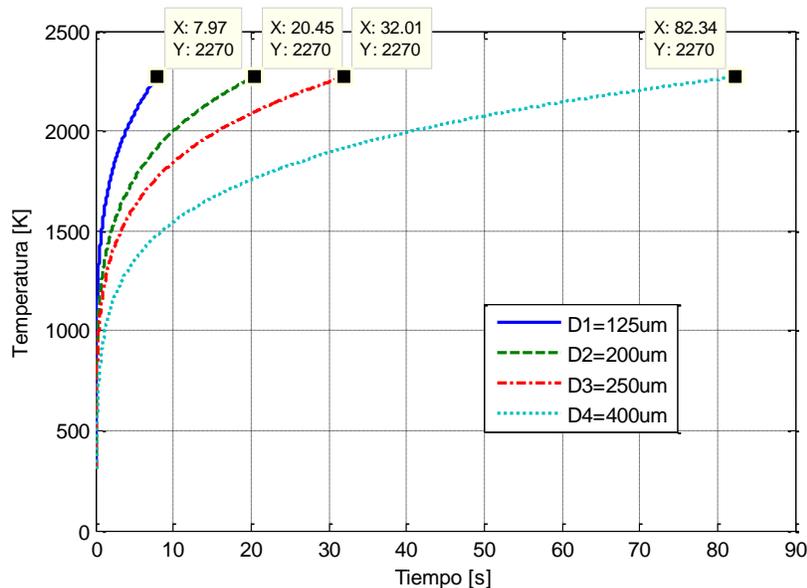
### 3.4 Resultados

Con el modelo matemático (3.32) y el respectivo programa de cálculo en MATLAB, se obtuvieron los datos, sobre la evolución de la temperatura de la fibra óptica (considerando como máxima temperatura la de fusión del sílice) en función del tiempo de exposición de la fibra óptica ante el haz láser. Los datos obtenidos para diferentes combinaciones de parámetros de la fibra óptica y del haz láser.

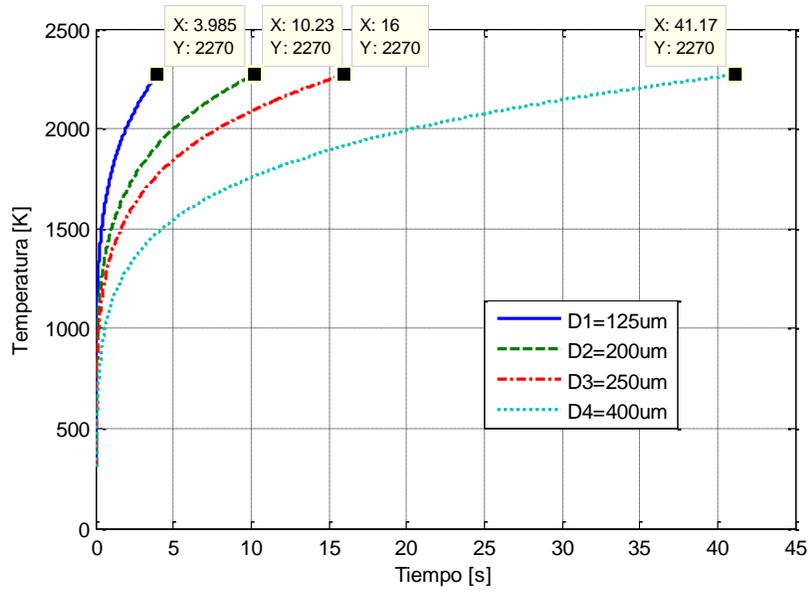
Los 4 diferentes diámetros de fibra óptica considerados en el programa de cálculo se encuentran en la siguiente tabla

<b>Fibra 1</b>	<b>Diámetro de 125 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>Fibra 2</b>	Diámetro de 200 $\mu\text{m}$
<b>Fibra 3</b>	Diámetro de 250 $\mu\text{m}$
<b>Fibra 4</b>	Diámetro de 400 $\mu\text{m}$

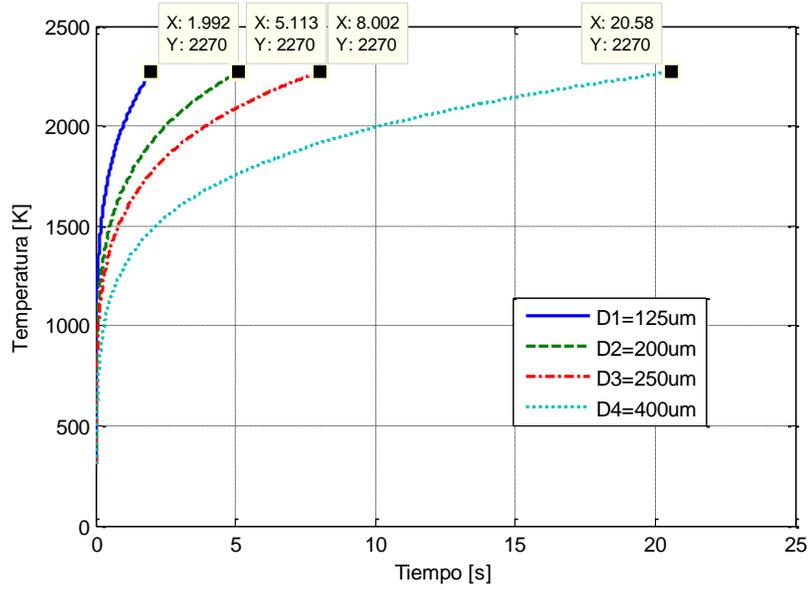
**Tabla 3.5. Diámetros de fibra óptica utilizados en los cálculos**



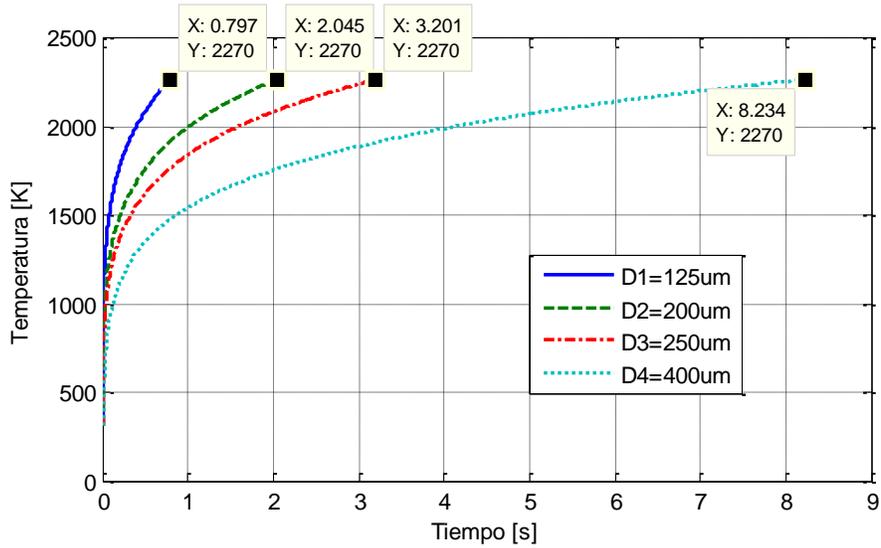
**Fig.3.4- Comportamiento de la temperatura absoluta respecto al tiempo con una potencia de 0.5W**



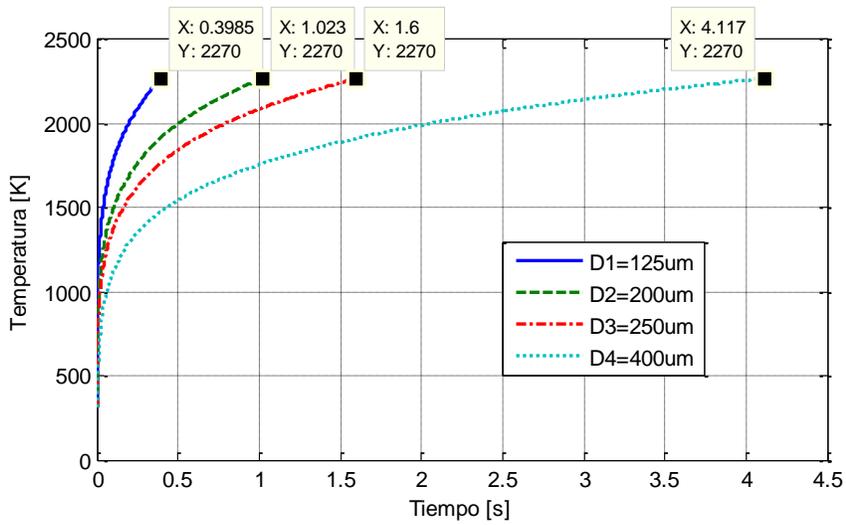
**Fig. 3.5- Comportamiento de la temperatura absoluta respecto al tiempo con una potencia de 1 W**



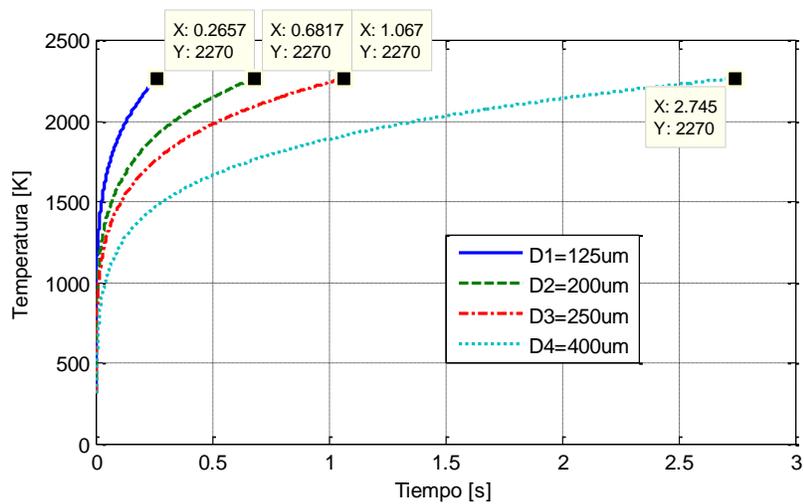
**Fig. 3.6- Comportamiento de la temperatura absoluta respecto al tiempo con una potencia de 2W**



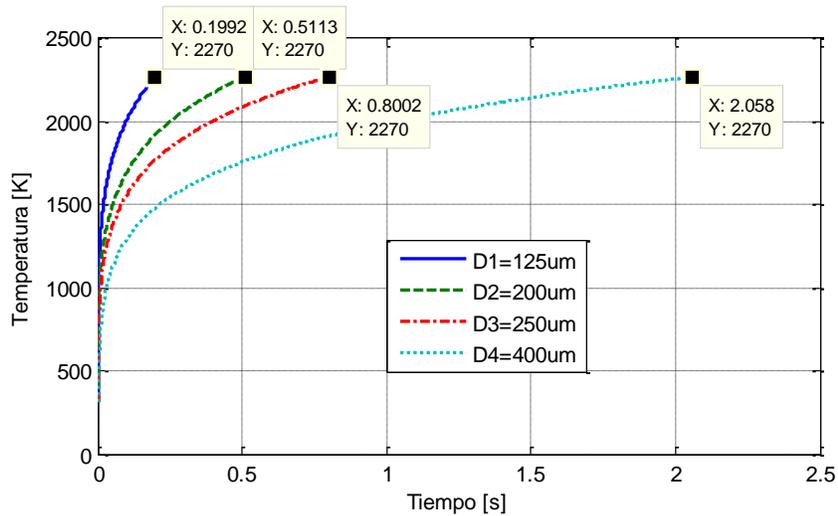
**Fig. 3.7- Comportamiento de la temperatura absoluta respecto al tiempo con una potencia de 5W**



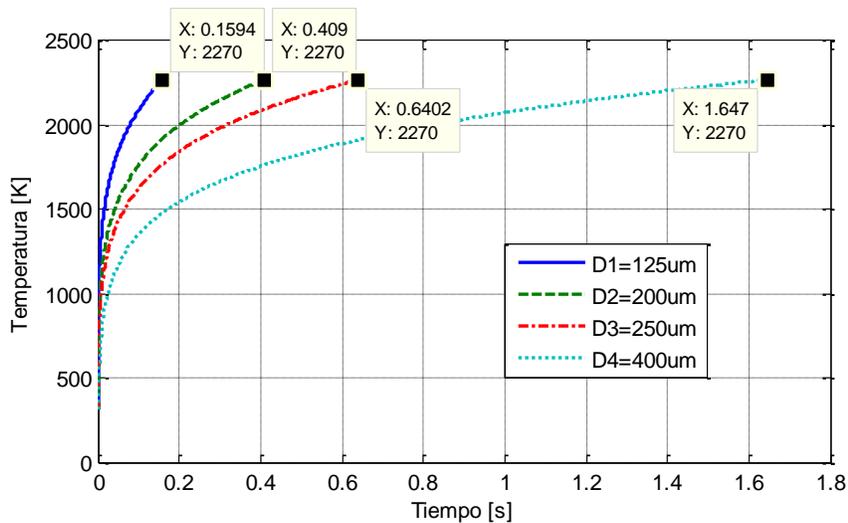
**Fig. 3.8- Comportamiento de la temperatura absoluta respecto al tiempo con una potencia de 10 W**



**Fig. 3.9- Comportamiento de la temperatura absoluta respecto al tiempo con una potencia de 15 W**



**Fig. 3.10- Comportamiento de la temperatura absoluta respecto al tiempo con una potencia de 20 W**



**Fig. 3.11- Comportamiento de la temperatura absoluta respecto al tiempo con una potencia de 25W**

El resultado obtenido en las gráficas anteriores sobre el comportamiento de los tiempos de exposición de la fibra óptica, que se presenta en forma gráfica en las figuras 3.4- 3.11, es un resultado esperado; dado que al disminuir la potencia y/o aumentar el diámetro de la fibra óptica el tiempo de exposición también aumenta. Para poder comparar de una manera más sencilla los resultados obtenidos teóricamente con los experimentales, se realizó una tabla con los valores esperados de tiempo para las temperaturas de fusión (2270 K) y cuando la fibra es suave ( $\approx 1938$  K) para los 4 diferentes diámetros de fibra óptica mencionados anteriormente.

Potencia [W]	Tiempo teórico de exposición Fibra 1 de 125 $\mu\text{m}$ [s]	Tiempo teórico de exposición Fibra 2 de 200 $\mu\text{m}$ [s]	Tiempo teórico de exposición Fibra 3 de 250 $\mu\text{m}$ [s]	Tiempo teórico de exposición Fibra 4 de 400 $\mu\text{m}$ [s]
0.5	7.9	20.4	32.01	82.34
1	3.985	10.23	16	41.17

2	1.992	5.113	8.002	20.58
5	0.797	2.045	3.201	8.234
10	0.39	1.02	1.6	4.11
15	0.265	0.681	1.06	2.74
20	0.199	0.511	0.8002	2.058
25	0.159	0.409	0.64	1.64

Tabla 3.6- Tiempo necesario de exposición de la fibra óptica para alcanzar la temperatura de fusión (2270 K) variando la potencia.

Potencia [W]	Tiempo teórico de exposición Fibra 1 de 125 $\mu\text{m}$ [s]	Tiempo teórico de exposición Fibra 2 de 200 $\mu\text{m}$ [s]	Tiempo teórico de exposición Fibra 3 de 250 $\mu\text{m}$ [s]	Tiempo teórico de exposición Fibra 4 de 400 $\mu\text{m}$ [s]
0.5	3.3	8.49	13.31	34.4
1	1.65	4.23	6.654	17.2
2	0.82	2.12	3.327	8.6
5	0.331	0.851	1.33	3.44
10	0.164	0.423	0.67	1.77
15	0.1097	0.283	0.445	1.15
20	0.0825	0.2116	0.3337	0.86
25	0.065	0.169	0.265	0.688

Tabla 3.7- Tiempo necesario de exposición de la fibra óptica para alcanzar la temperatura en que la fibra se hace suave ( $\approx 1938$  K) variando la potencia.

Con el modelos matemático desarrollado, también es posible analizar el comportamiento de la Potencia del haz láser cuando se varía el tiempo y la temperatura. A continuación se muestra una gráfica de la Temperatura contra la Potencia para un tiempo de 1ms para los 4 diferentes diámetros de fibra óptica que hemos considerado durante esta sección.

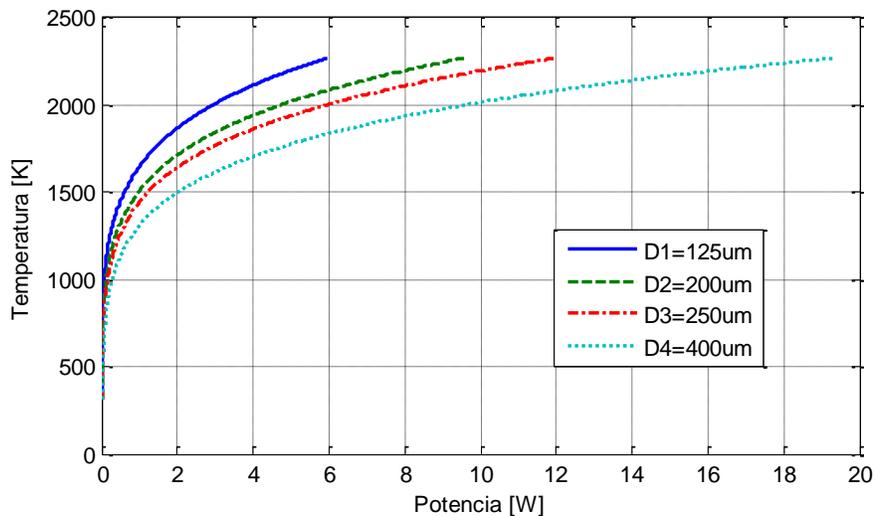
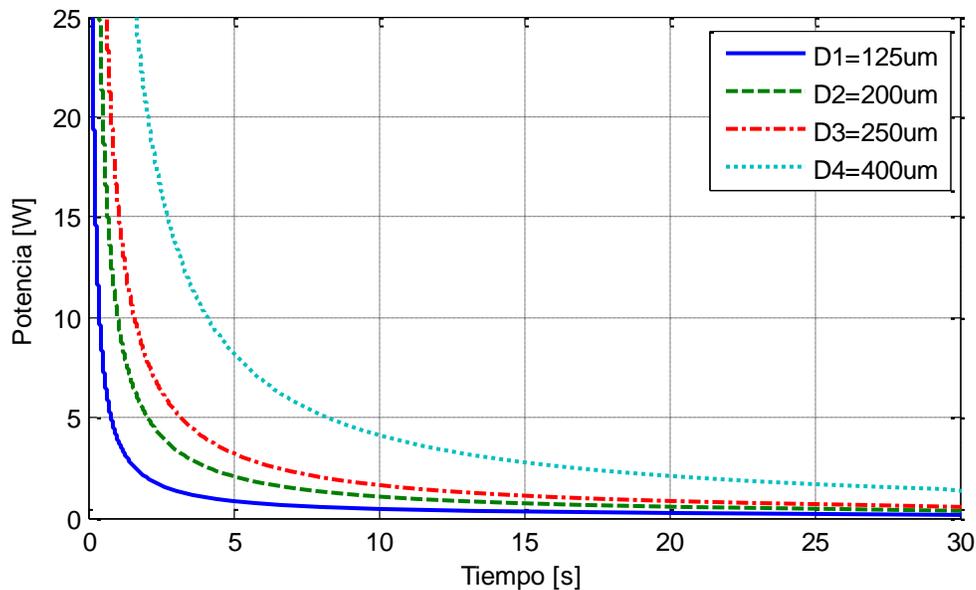
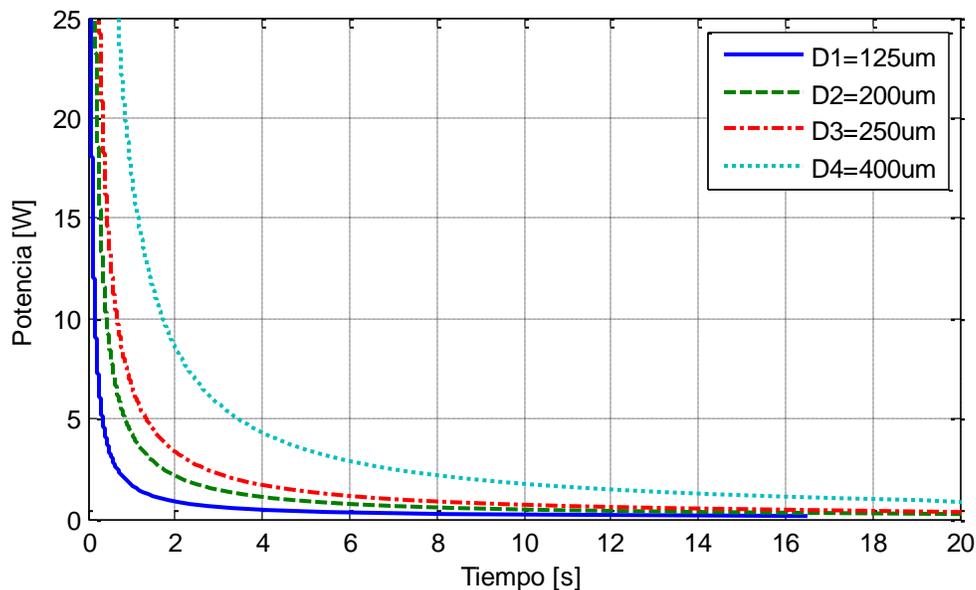


Fig. 3.12- Comportamiento de la temperatura respecto a la potencia tomando un tiempo de 0.5 [s]

Es posible analizar el comportamiento de la potencia respecto al tiempo con el modelo matemático desarrollado. A continuación se muestran las gráficas del comportamiento de la potencia respecto al tiempo para dos diferentes temperaturas, la de fusión del sílice (2270 K) y la temperatura a la que el sílice es suave ( $\approx 1938$  K) para los 4 diferentes diámetros de fibra óptica que hemos considerado.



**Fig. 3.13- Comportamiento de la potencia respecto al tiempo para una temperatura de 2270K**



**Fig. 3.14- Comportamiento de la potencia respecto al tiempo para una temperatura de 1938K**

Al realizar la evaluación de los factores que interactúan en el proceso de grabado de rejillas de periodo largo, podemos simplificar el modelo matemático suprimiendo los efectos de conducción térmica y convección térmica dado que el efecto de éstos no representa ni un 1% del valor máximo de radiación térmica.

El modelo matemático simplificado quedaría de la siguiente forma:

$$P_a \times t \times \eta \times F_g = E + (R) \times \tau_0 \quad (3.33)$$

Sustituyendo E y R por las fórmulas antes mencionadas, el modelo matemático nos queda de la siguiente manera:

$$P_a \times t \times \eta \times F_g = C_p(T - T_0) + \sigma \varepsilon A \left[ \int_0^t T^4(t) dt - T_0^4 t \right] \quad (3.34)$$

Donde  $P_a$  es la potencia absorbida por la fibra óptica,  $t$  es el tiempo de exposición de la fibra óptica,  $\eta$  es la eficiencia del sistema,  $F_g$  el factor geométrico,  $C_p$  el calor específico del sílice,  $T$  es la temperatura final de la fibra óptica,  $T_0$  la temperatura inicial de la fibra óptica,  $\sigma$  el coeficiente de Boltzman y  $\varepsilon$  el coeficiente de emisividad del sílice.

## Conclusiones

Se realizó una revisión bibliográfica de modelos relacionados a la fabricación de RPL en fibra óptica así como de modelos matemáticos del tratamiento de materiales por medio de tecnología láser. Se realizó la evaluación de los factores que interactúan en el proceso de grabado de rejillas en fibra óptica mediante la técnica de grabado punto a punto con un láser enfocado de CO<sub>2</sub>; esta evaluación nos permitió descartar los factores que no contribuyen de manera significativa en el proceso de fabricación y obtener un modelo matemático simplificado que nos ayuda a aproximar de manera eficiente los parámetros necesarios para la fabricación de RPL en fibra óptica.

El resultado de la evaluación de los elementos que participan en el proceso de fabricación de rejillas en fibra óptica fue el esperado; el efecto de radiación térmica es el que representa la mayor pérdida en el proceso de producción de RPL en fibra óptica por la técnica de grabado punto a punto. En la expresión para el cálculo del efecto de radiación térmica intervienen valores de una magnitud mayor que en el caso de los demás efectos, es decir, a pesar de que el área de la fibra óptica que radia es muy pequeña se tienen valores de temperatura por encima de los mil grados kelvin, que a su vez son elevados a la cuarta potencia.

# CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

## Introducción

La instalación experimental para la fabricación de RPL en fibra óptica que se utilizó para realizar los experimentos del presente trabajo se puede dividir en 4 partes para que su explicación sea más clara. Las partes en que dividimos esta instalación son las siguientes:

1. Fuente láser de CO<sub>2</sub>
2. Sistema de enfoque
3. Unidad de desplazamiento
4. Equipo de medición

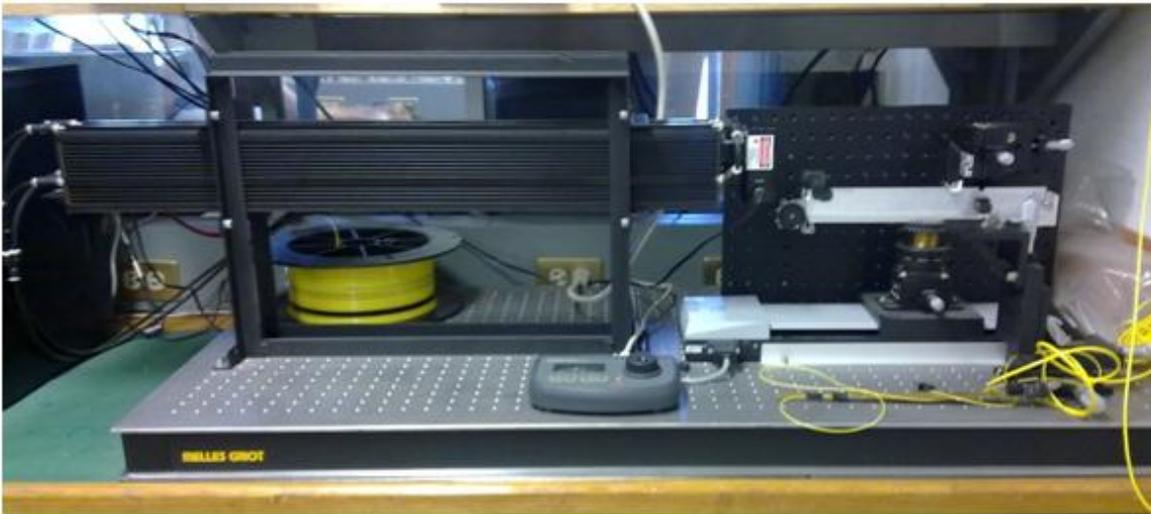


Fig. 4.1. Instalación experimental (fuente láser, unidad de desplazamiento y sistema de enfoque)

## 4.1 Fuente láser de CO<sub>2</sub>

Esta sección está dedicada al conjunto del láser de CO<sub>2</sub> y el sistema de control de tiempo y potencia del láser de CO<sub>2</sub> (control UC-2000) que forman la fuente de nuestra instalación para la fabricación de RPL en fibra óptica. A continuación se explicará el funcionamiento y detalles técnicos de estos dos dispositivos que son una parte importante en el proceso de grabado de rejillas por medio de la técnica de grabado punto a punto.

### 4.1.1 Láser de CO<sub>2</sub>

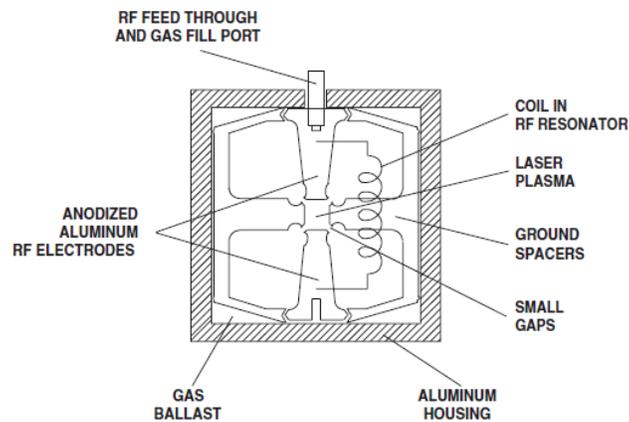
El láser utilizado es de CO<sub>2</sub> de onda continua marca Synrad modelo J48-2W, con las siguientes especificaciones técnicas:

Potencia de salida	25 W
Calidad de modo	TEM <sub>00</sub> , 95% de pureza M <sup>2</sup> < 1.2
Elipticidad	<1.2
Tiempo de subida	<150μsec
Diámetro del haz	3.5mm
Divergencia del haz	4mR

Longitud de onda	10.57-10.63 $\mu\text{m}$
Estabilidad de potencia	$\pm 5\%$
Polarización	Lineal (vertical)
Refrigeración	Agua
Carga de calor máxima	500 W
Voltaje y corriente de entrada	30 VDC / 14 A
Dimensiones	810 x 71 x 107 mm
Peso	8.2 Kg
<b>ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS</b>	
Voltaje	30 VDC
Corriente máxima	14 A

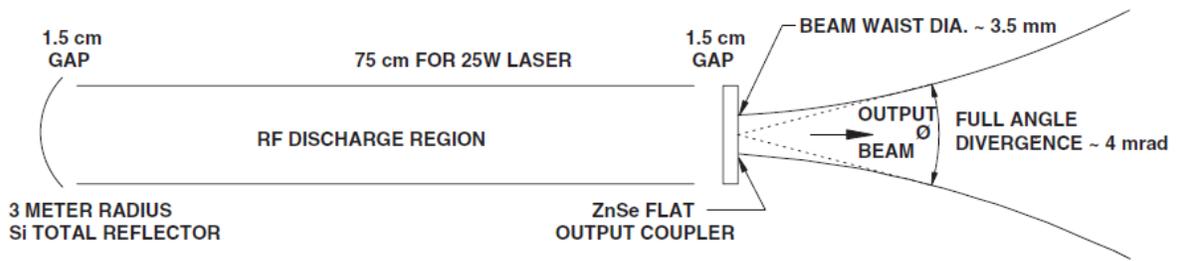
**Tabla 4.1. Especificaciones técnicas del láser de CO<sub>2</sub>  
marca Synrad modelo J48-2W**

El láser está formado por un tubo de plasma cuadrado, excitado por una señal de RF de 45 MHz (frecuencia de resonancia del plasma del tubo) con espejos ajustables en cada extremo del tubo, montados conjuntamente con el dispositivo de excitación de RF en un chasis de aluminio.



**Fig. 4.2- Diagrama de la sección transversal del láser  
Synrad J48-2W**

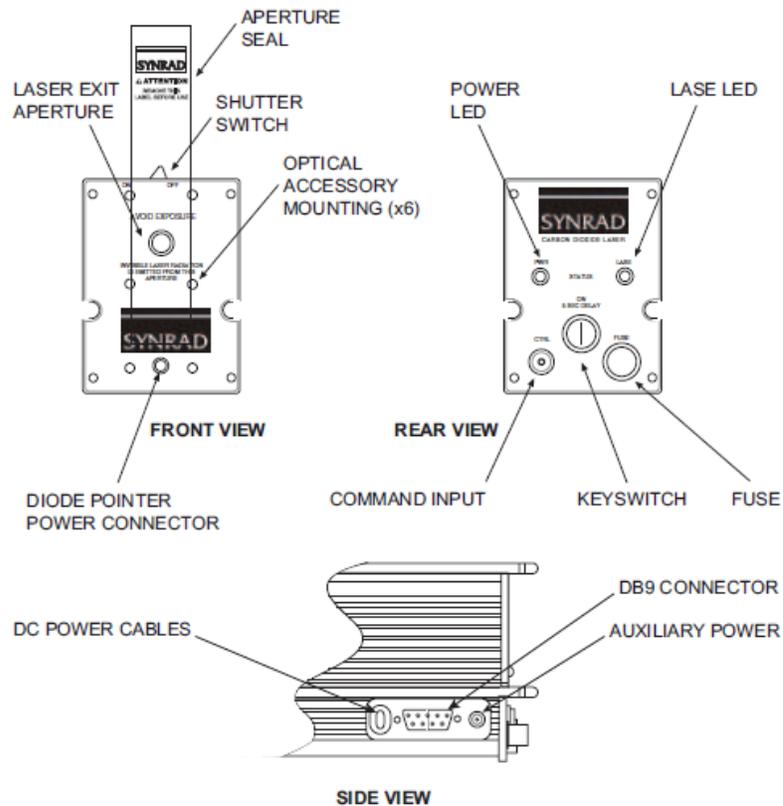
El resonador óptico del láser está conformado por un espejo reflector total de tres metros de radio de curvatura y un acoplador plano de salida de seleniuro de zinc (ZnSe) con reflectividad de 95% o 92%. La ventana de salida de 4.8 mm en conjunto con la curvatura del espejo seleccionada, limitan el haz de salida al modo TEM<sub>00</sub>, cuando los espejos están perfectamente alineados.



**Fig. 4.3- Resonador óptico de láser Synrad J48-2W**

El control de la potencia de salida se logra por modulación de anchos de pulso (PWM por sus siglas en inglés) del circuito controlador de RF.

Debido a que la radiación del láser de CO<sub>2</sub> no es visible, los láseres de la marca Synrad vienen equipados con un diodo láser que opera en la luz roja (680 nm). Este haz tiene la misma divergencia y diámetro que el haz infrarrojo. Este diodo láser se alimenta con 5 VDC con una corriente máxima de 100 mA.



**Fig. 4.4- Esquema de los controles e indicadores del láser Synrad J48-2W**

Finalmente se muestra un diagrama de las dimensiones del láser de CO<sub>2</sub> Synrad J48-2W, las dimensiones se encuentran en pulgadas.

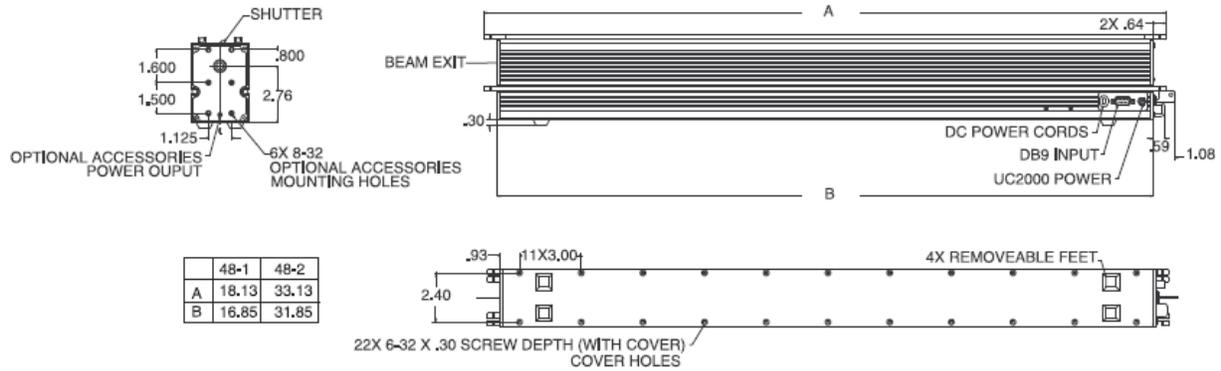


Fig. 4.5- Dimensiones del láser de CO<sub>2</sub>

#### 4.1.2 Sistema de control de potencia y tiempo

Para el control de la potencia de salida y tiempo de nuestro láser se cuenta con un control para el láser marca Synrad modelo UC-2000, mediante este control se puede seleccionar la potencia del láser y el tiempo que dure el pulso del haz láser de forma remota o manual.

El control Synrad modelo UC-2000 presenta las siguientes especificaciones técnicas:

Voltaje y corriente de entrada	15-50 VDC / 35 mA máximo
Salida PWM	100mA, 50W controlador CMOS
Frecuencia de reloj	± 10% de exactitud
ESPECIFICACIONES AMBIENTALES	
Temperatura de operación	0° C -40° C
Humedad	0-80%
Dimensiones	
Largo	177.9 mm
Ancho	107.4 mm
Altura	53.3 mm
Peso	0.52 Kg

Tabla 4.2. Especificaciones del control CU-2000

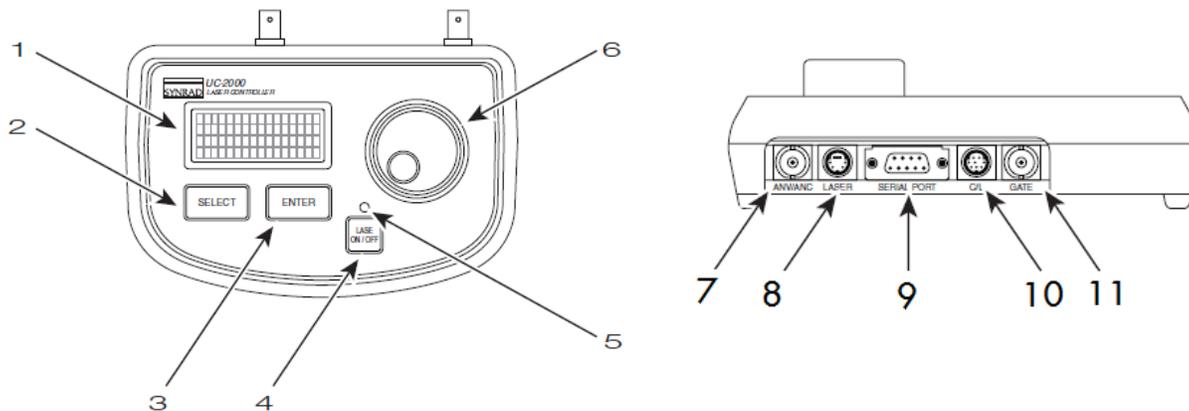
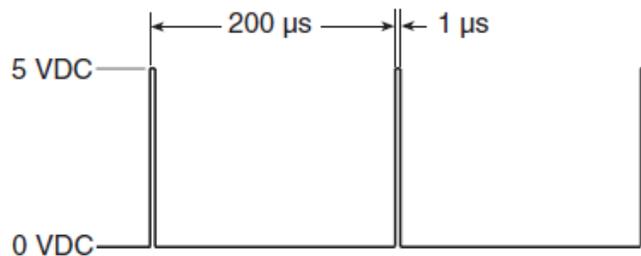


Fig. 4.6. Unidad de control para el láser UC-2000

1. Display LCD.
2. Botón de selección.
3. Botón de ingreso.
4. Botón de encendido/apagado.
5. Indicador de operación.
6. Perilla ajustable PWM, cambia el ciclo de trabajo de PWM en incrementos de 0.5 %
7. Conector ANV/ANC, para aplicar señales analógicas externas.
8. Conector mini DIN de 4 pines para el láser.
9. Puerto DB9.
10. Conector mini DIN de 8 pines, para controlar otros dispositivos de la marca Synrad.
11. Conector GATE, es un conector BNC que permite apagar o encender el láser utilizando señales externas.

La unidad de control UC-2000 modera la potencia del láser utilizando modulación por ancho de pulso (PWM). Las señales de comando PWM varían el ciclo de trabajo del amplificador de RF del láser, que a su vez controla el tiempo promedio de la señal de RF aplicada para excitar el gas del tubo del láser. Este dispositivo tiene 3 frecuencias PWM: 5 KHz, 10 KHz y 20 KHz. La frecuencia de 5 KHz es estándar, dado que, funciona bien para diferentes procesos. Por otra parte la señal de PWM tiene 3 parámetros principales, amplitud, frecuencia y ciclo de trabajo PWM.

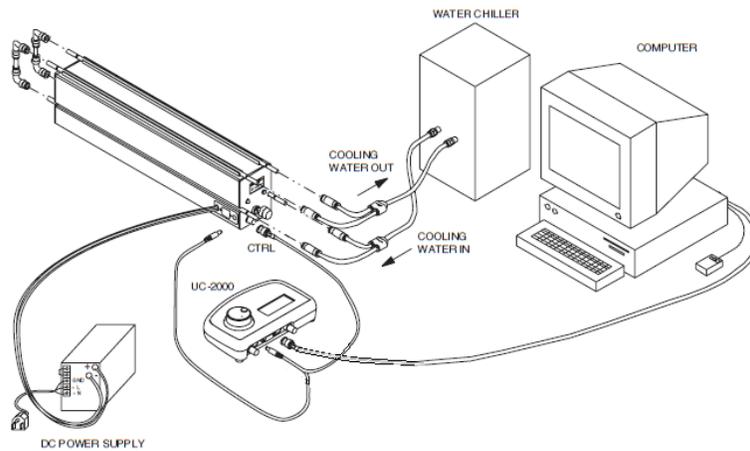
La frecuencia estándar PWM (5 KHz) varía el ancho de los pulsos desde 0  $\mu\text{m}$  (equivalente a la potencia mínima del láser que es cero) y 190  $\mu\text{m}$  (es la potencia máxima del láser). Todos los láseres de la marca Synrad necesitan pulsos delgados, con las características que se muestran en la figura 4.7, para pre-ionizar el gas del láser justo debajo del umbral para la emisión láser lo cual hace que la respuesta del láser sea casi instantánea después de que se envía una señal PWM para la generación de un haz láser de cierta potencia. Este tipo de pulsos son enviados por el control UC-2000 solo cuando el comando de la señal PWM es bajo.



**Fig. 4.7- Parámetros de la señal PWM**

Cuando la amplitud de la señal oscila entre el rango de 0.0 V a +0.5 V, el láser está apagado, es decir no genera ningún haz; cuando la amplitud está en el rango de +3.5 V a +0.5, el láser está encendido y por tanto se genera un haz láser.

El láser de CO<sub>2</sub> se encuentra conectado al control UC-2000 a través del conector mini DIN de 4 pines, a su vez el control UC-2000 está conectado a una PC por medio del conector DB9. El esquema de conexión se muestra en la siguiente figura.



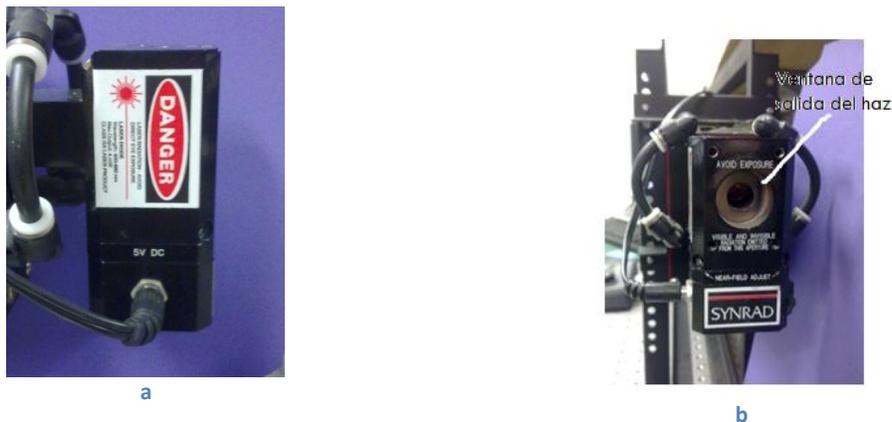
**Fig. 4.8-** Esquema de configuración de la fuente láser con la PC

## 4.2 Sistema de enfoque

El sistema de enfoque está formado por tres elementos un diodo láser, un espejo y un lente. Estos elementos nos ayudan a cambiar la dirección del haz láser así como enfocararlo en la fibra óptica y el diodo nos permite ver en dónde se encuentra el haz del láser, dado que la longitud de onda en la que éste opera no se encuentra en el rango de luz visible.

### 4.2.1 Diodo láser

El haz del láser de CO<sub>2</sub> es invisible, por tal motivo el láser está equipado con un diodo láser para visualizar la posición del haz infrarrojo. El diodo láser es de la marca Synrad de GaAs y opera a una longitud de onda de 680 nm. El ancho del haz es igual al generado por el láser de CO<sub>2</sub>, es decir de 3.5 mm. Cuenta con una divergencia de haz de 4 mR. Este diodo láser se alimenta con 5 VDC con una corriente máxima de 100 mA.

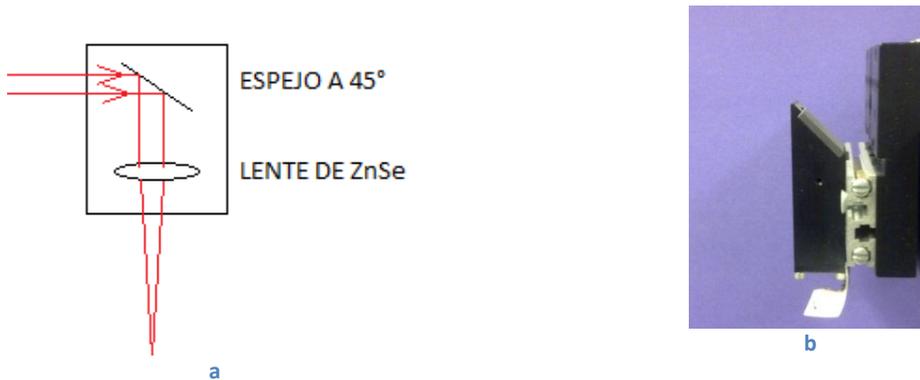


**Fig. 4.9-** Fotografías del diodo láser  
(a) vista lateral. (b) vista frontal

### 4.2.2 Sistema de enfoque

El sistema de enfoque está formado por un espejo de aluminio plano y un lente de ZnSe. Estos elementos se encuentran juntos y nos sirven para modificar la trayectoria del haz láser y posteriormente enfocararlo. El espejo se encuentra posicionado a 45° para cambiar la dirección del haz láser, es decir, el haz se desplaza de manera horizontal y al reflejarse en el espejo cambia su trayectoria y ahora se desplaza de forma vertical.

La función del lente es enfocar el haz láser en la fibra óptica después de ser reflejado por el espejo, con el enfoque del haz se consigue una densidad de potencia mayor. Este espejo tiene una distancia focal de  $F = 36 \text{ mm}$ .



**Fig. 4.10-Imagen del lente y espejo. (a) esquema de los elementos. (b) fotografía de los elementos.**

### 4.3 Unidad de desplazamiento

La unidad de desplazamiento usada es de la marca Physik Intrumente modelo M-521-DD. Algunas de sus especificaciones técnicas son las siguientes.

Sensor integrado	Codificador lineal
Resolución del sensor	0.1 $\mu\text{m}$
Movimiento incremental mínimo	0.1 $\mu\text{m}$
Máxima velocidad	50 mm/s
Voltaje de operación	24[V]

**Tabla 4.3 Unidad de desplazamiento**

Esta unidad de desplazamiento está diseñada para satisfacer los más exigentes requerimientos de posicionamiento, algo que es crucial en el proceso de grabado de RPL en fibra óptica. Las unidades de desplazamiento están equipadas con carriles de alta precisión y de guiado lineal con recirculación de rodamientos para garantizar 1  $\mu\text{m}/100 \text{ mm}$  de rectitud y planitud. Este equipo proporciona alta capacidad de carga y precisión de guiar con larga vida útil.

El diseño ActiveDrive, desarrollado por IP, cuenta con una gran eficacia en amplificadores PWM, montada de lado a lado con el motor de corriente continua que ofrece varias ventajas:

- Aumento de la eficiencia, al eliminar las pérdidas de potencia entre el amplificador y el motor.
- Reducción del coste y una mayor fiabilidad, ya que ningún controlador externo es necesario.
- Eliminación del ruido del amplificador PWM, mediante el montaje del amplificador y el motor juntos.

El M-5x1.PD versión ofrece velocidades de hasta 125 mm/s. Está equipado con un motor de corriente continua y Active Drive codificador rotatorio. Proporcionan repetibilidad superior de sólo 0.2 micrómetros por medio de codificadores ópticos lineales integrados. Un motor de freno que asegura el mantenimiento de la posición de la plataforma después de apagado también está disponible.

Estas unidades de desplazamiento cuentan con un motor de DC de circuito cerrado con codificadores de posición y reductores de precisión que proporcionan incrementos de movimiento mínimo de 0.1 micrómetro con velocidades hasta de 6 mm/s.

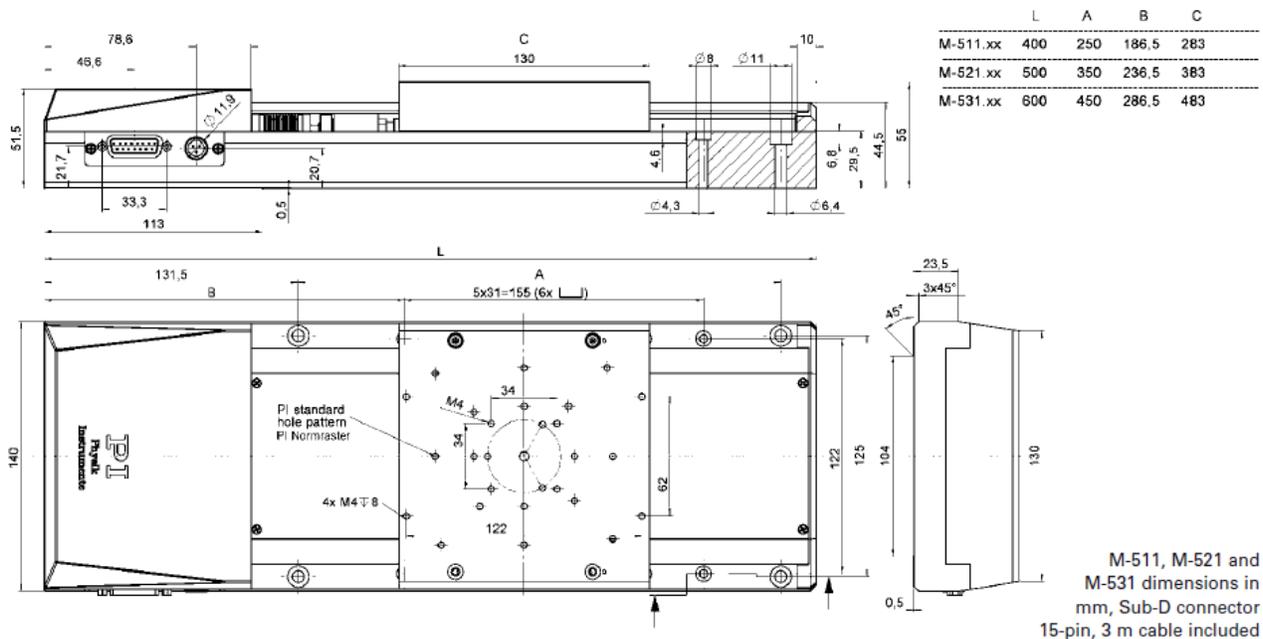


Fig. 4.11- Esquema de la unidad de desplazamiento

## 4.4 Equipo de Medición

Para el proceso de fabricación de RPL en fibra óptica se utilizó la inidad óptica de una empalmadora de la marca fukijura, para la revisión visual de las deformaciones de la fibra óptica debida a la exposición de ésta ante el haz láser.

## Conclusiones

En este capítulo se describieron las características de los elementos que forman la instalación experimental. Debemos resaltar que todos los elementos de la instalación tienen un papel importante en el proceso de grabado de RPL en fibra óptica. El láser utilizado en esta instalación emite un haz a una longitud de onda de  $10.6 \mu\text{m}$ , donde el sílice presenta una absorción de 70% de la potencia incidente.

Por otro lado la unidad de desplazamiento debe ser lo suficientemente sensible y exacta en los desplazamientos de la fibra óptica, en este caso la unidad de desplazamiento usada tiene un incremento mínimo de  $0.1 \mu\text{m}$ ; recordemos que los periodos de las RPL en fibra óptica son mayores a  $100 \mu\text{m}$ , por tanto este valor es bastante aceptable para que la unidad de desplazamiento funcione de manera eficiente.

# CAPÍTULO 5. RESULTADOS

## Introducción

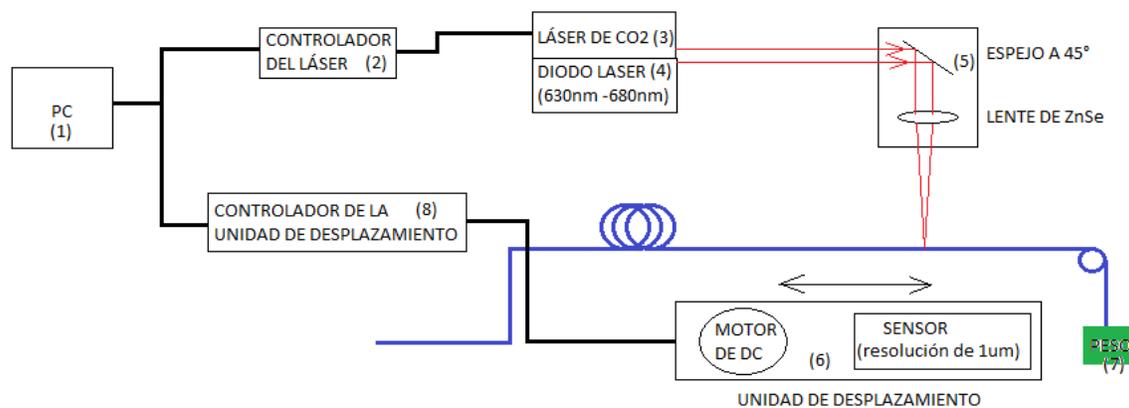
En este capítulo se explicará la forma en que se realizaron los experimentos así como su análisis y la comparación con los resultados teóricos que se obtuvieron con el modelo matemático desarrollado en el capítulo 3 del presente trabajo.

### 5.1 Descripción del experimento

La técnica que se utilizó para fabricar las RPL en fibra óptica es la de grabado punto a punto con un láser enfocado de CO<sub>2</sub>. Esta técnica es una de las más usadas por su gran flexibilidad para modificar el periodo de la rejilla de una manera sencilla en comparación con otras técnicas. En nuestra instalación, la selección de parámetros como el periodo se realiza a través de una computadora conectada al controlador del láser y al de la unidad de desplazamiento.

Mediante la computadora, conectada a los controladores del láser y de la unidad de desplazamiento, podemos seleccionar los siguientes parámetros: el periodo, el número de puntos que se grabarán en la fibra óptica, el tiempo de exposición de la fibra ante el haz láser y la potencia de dicho haz.

En el siguiente esquema se puede observar la forma en la que se encuentran interconectados los elementos que forman parte de nuestra instalación para la fabricación de RPL en fibra óptica.



**Figura 5.1- Esquema de fabricación de RPL en fibra óptica**

El control de la potencia y tiempo de radiación se hizo por medio del software LabVIEW de National Instruments, versión 7.1. Este software puede comunicarse con otros dispositivos a través del puerto serial de la computadora, en nuestra instalación hay 2 dispositivos conectados al puerto serial de la computadora, el primero es el control UC-2000 y el segundo dispositivo es la unidad de desplazamiento PI M521-DD. El software LabVIEW puede interactuar con aplicaciones Active X (protocolo OLE), permitiendo controlar dispositivos externos al igual que aplicaciones como Microsoft EXCEL. Utilizando las herramientas antes mencionadas, el control de la potencia del láser así como la duración de los pulsos se realiza poniendo los datos en una hoja de cálculo de Excel; estos datos son importados por LabVIEW y enviados a los dispositivos conectados a la computadora.

Después de realizar el procedimiento anterior, el láser de CO<sub>2</sub> emitirá un haz con la potencia y tiempo seleccionado en la hoja de cálculo de Excel; después de que el tiempo del haz láser finaliza, la unidad de desplazamiento traslada la fibra óptica una distancia igual al periodo de la rejilla, este intervalo también se fija en la hoja de cálculo de Excel.

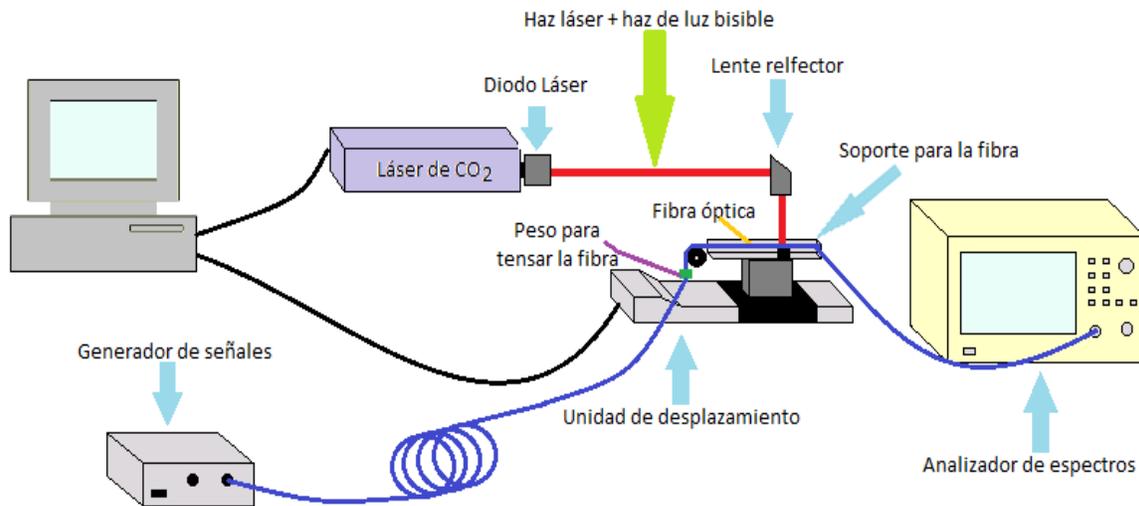


Figura 5.2- Esquema general de la instalación experimental

## 5.2 Resultados del experimento

Las pruebas de fabricación de RPL en fibra óptica se realizaron en fibra de sílice (Thorlabs SMF-28) y con diferentes potencias del haz láser, en el rango de 0.1 W a 15 W. La duración del pulso del haz láser se varió lentamente hasta conseguir la deformación del núcleo de la fibra que corresponde a un elemento de la rejilla; esta deformación consta de una reducción en el diámetro de la fibra óptica en la zona expuesta ante el haz láser.

Los experimentos realizados arrojan datos sobre el comportamiento de la temperatura respecto el tiempo, los cuales coinciden con los datos teóricos; sin embargo, existen diferencias entre los valores obtenidos.

Para una fibra óptica de diámetro igual a 125  $\mu\text{m}$  y la potencia del haz láser de 2W, el tiempo teórico de exposición para llegar a la temperatura de fusión del sílice es de 28 ms mientras que en el experimental se necesita un mayor tiempo de exposición de la fibra ante en haz láser. La diferencia entre los valores de potencia es de un factor aproximadamente de 2.5, es decir, si se multiplica el valor teórico por ese factor se puede encontrar el valor experimental del tiempo de exposición.

Después de obtener el dato experimental, se procedió a grabar una RPL en fibra óptica SMF-28, a continuación se muestran las fotografías de la fibra óptica antes y después del tratamiento para grabar RPL en fibra óptica.

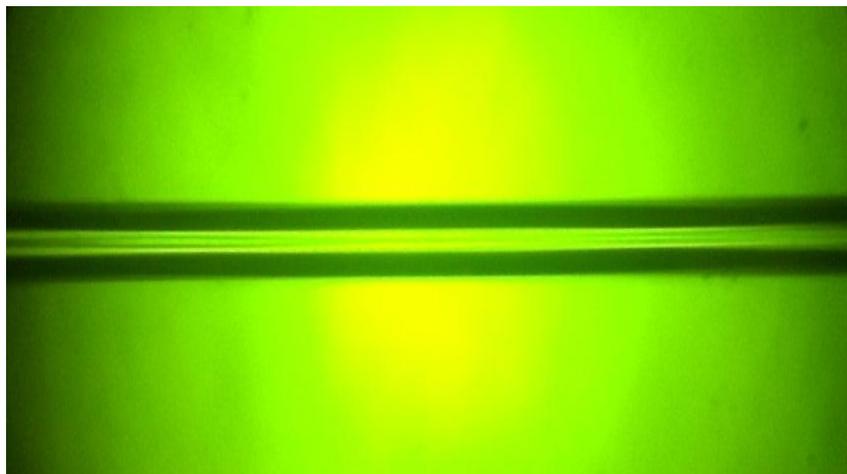
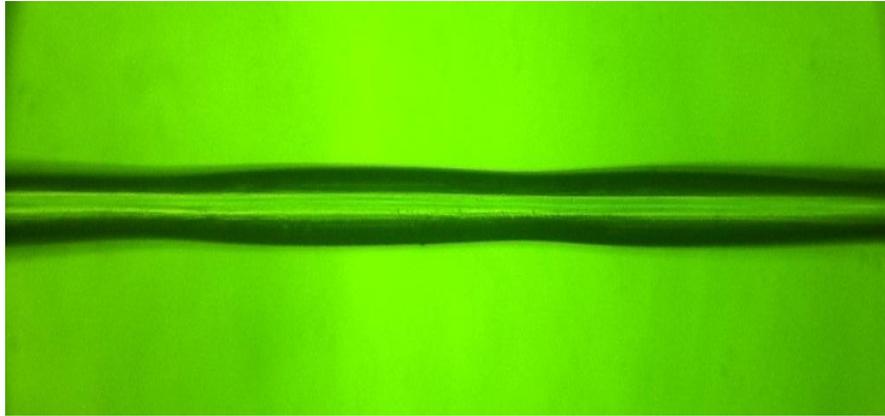


Fig. 5.3- Fibra óptica antes del tratamiento



**Fig. 5.4- Fibra óptica después del tratamiento**

### 5.3 Análisis de los resultados

Los valores obtenidos de manera experimental varían de los obtenidos teóricamente. Las posibles causas de estas variaciones pueden ser por las siguientes causas:

- Variación de los coeficientes térmicos del sílice
- Enfoque del haz láser en la fibra óptica
- Potencia del haz láser

El estudio de la variación de los coeficientes térmicos de algunos materiales, principalmente metales, en procesos de tratamiento de materiales mediante láseres nos indica que es un factor importante que se debe considerar dado que el cambio de temperatura en estos procesos abarca un rango muy grande, incluso en algunos procesos se debe llegar a un cambio de fase del material que se está procesando. En el proceso de fabricación de RPL en fibra óptica, el rango de temperaturas consideradas es el siguiente 20 °C hasta 2000 °C; sin embargo, los valores de los coeficientes térmicos utilizados en el modelo matemático están calculados para temperaturas de 20°C hasta 100 °C. El coeficiente de emisividad afecta de manera significativa al modelo matemático dado que se multiplica por términos elevados a la cuarta potencia; además, el coeficiente de emisividad del sílice también es utilizado para la aproximación del coeficiente de convección, lo cual implica una variación [1].

En la figura 5.5 se observa que al aumentar la temperatura, el coeficiente de conductividad térmica del sílice también se incrementa. Este comportamiento se tiene en todos los coeficientes térmicos involucrados en el modelo matemático; sin embargo, en la bibliografía solamente existen valores para temperaturas en el rango de 20-100 °C. En la industria de los metales, existen estudios específicos del comportamiento de estos coeficientes térmicos en rangos de temperatura grandes, aproximadamente de una temperatura ambiente hasta los 1500 °C.

Uno de los factores más importante en este proceso es la potencia del láser que va a incidir en la fibra óptica y también posicionar la fibra en el punto máximo de potencia del haz láser. La comprobación de la potencia que incide en la fibra óptica no se pudo realizar debido a que no se cuenta con un medidor de potencia óptica, por tanto se aproximó considerando las pérdidas por los elementos del sistema de enfoque de la instalación. Por otra parte, la fibra óptica fue colocada en una sección donde el haz láser podía afectarla; sin embargo, no se pudo comprobar que la fibra estuviera posicionada en el punto de potencia máxima.

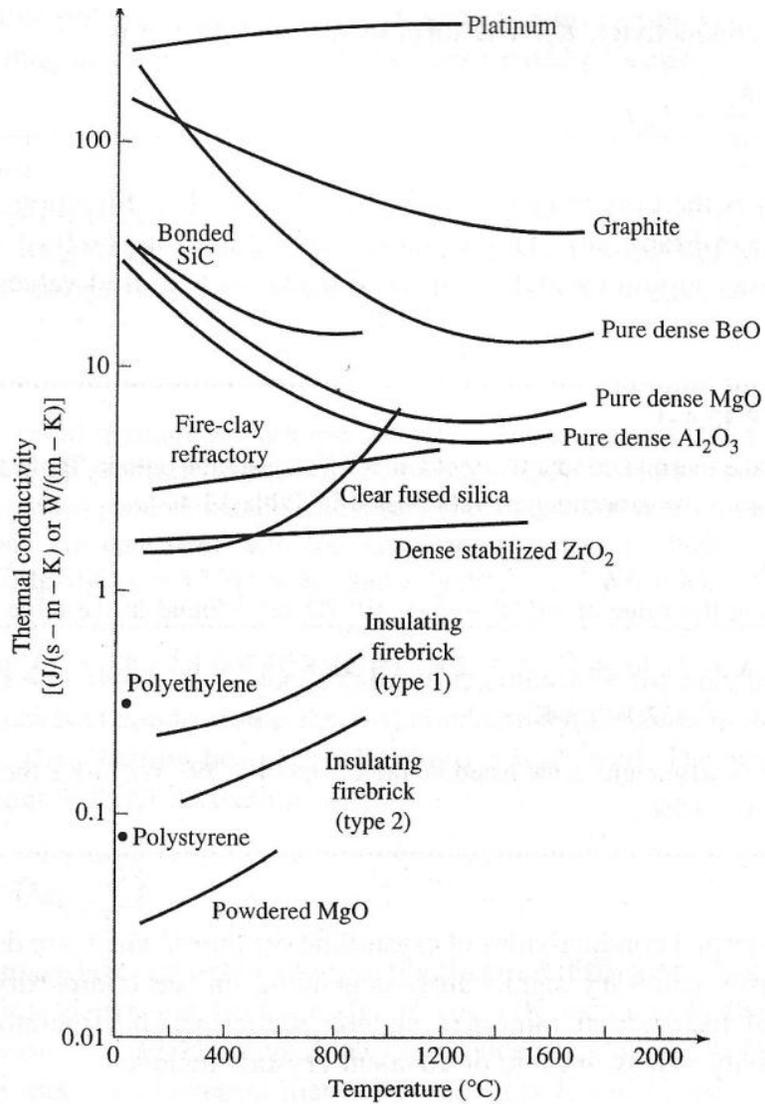


Figura 5.5 Variación del coeficiente de conductividad térmica con la temperatura

## Conclusiones

Se comprobó que el método de fabricación de RPL en fibra óptica funciona, dado que se lograron grabar rejillas de periodo en la fibra óptica.

El modelo matemático desarrollado en el presente trabajo produce resultados que funcionan para la aproximación del tiempo necesario para fabricar RPL en fibra óptica.

Las variaciones de los resultados experimentales con los teóricos se pueden atribuir a diferentes factores, como el cambio de los coeficientes térmicos del sílice cuando se incrementa la temperatura o la potencia incidente en la fibra óptica.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Se realizó un estudio detallado del estado del arte de las RPL en fibra óptica, donde se observa que las técnicas de fabricación de rejillas se encuentran en desarrollo. Una de las técnicas más utilizadas por su versatilidad es la de grabado punto a punto con un láser enfocado.
- Se desarrolló un modelo matemático del tratamiento térmico de fibras ópticas con un láser de CO<sub>2</sub> que nos permite variar ciertos parámetros como el tiempo de exposición de la fibra ante el haz láser, la potencia del haz, el diámetro de la fibra óptica y la temperatura de la fibra óptica.
- Se fabricaron algunas muestras de RPL en fibra óptica con la técnica de grabado punto a punto con un láser enfocado de alta potencia, en este trabajo se utilizó un láser de CO<sub>2</sub>.
- Se comprobó que la técnica de fabricación de RPL en fibra óptica y la instalación experimental implementada en este trabajo cumple con el cometido de fabricar RPL en fibra óptica por medio de un láser de CO<sub>2</sub> enfocado.

# REFERENCIAS

## Capítulo 1

1. Hill, K. O., et al. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication" *Applied Physics Letters*, Vol. 32, 1978, pp. 647-649.
2. Kawasaki, B. S., et al. "Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers," *Optics Letters*, Vol. 3, 1978, pp. 66-68.
3. Bennion, I., et al. "UV-written in-fibre Bragg gratings," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 28, 1996, pp. 93-135.
4. Othonos, A. and Kally, K. (1999). "Fiber Bragg gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunication and Sensing," London: Artech House.
5. Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S. Yu. (2008). *Fiber optic sensors*. Florida : CRC.
6. Lam, D. K. W. and Garsie B. K., "Characterization of single mode optical fiber filters," *Applied Optics*, Vol. 20, 1981, pp. 440-445.
7. Albert, J., et al. "Apodisation of the spectral response of fibre Bragg grating using a phase mask with variable diffraction efficiency," *Electronics Letters*, Vol. 31, 1995, pp. 222-223.
8. Malo, B., et al. "Apodised in-fibre Bragg grating reflectors photoimprinted using a phase mask," *Electronics Letters*, Vol. 31, 1995, pp. 223-225.
9. Kashyap, R., Swanton, A. and Armes, D. J., "Simple technique for apodising chirped and unchirped fibre Bragg gratings," *Electronics Letters*, Vol. 32, 1996, pp. 2260-2261.
10. Othonos, A., Lee X and Measures R. M., "Superimposed multiple Bragg gratings," *Electronics Letters*, Vol. 29, 1994, pp. 1972-1973.
11. Alferness, R. C., et al. "Narrowband grating resonator filters in InGaAsP/InP waveguides," *Applied Physics Letters*, Vol. 49, 1986, pp. 125-127.
12. Vengsarkar, A. M., et al. "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *IEEE Journal of Lighthwave Technology*, Vol. 14, 1996, pp. 58-65.
13. Stegall, D. B. and Erdogan, T. "Dispersion control with use of Long-period fiber gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, Vol. 17, pp. 304-312.
14. Ke, H., Chiang, S. and Peng, J. H. "Analysis of phase-shifted long period fiber gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, pp. 1596-1598, 1998.
15. Meltz, G., Morey, W. W. and Glenn W. H., "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Optics Letters*, Vol. 14, 1989, pp. 823-825.
16. Kashyap, R., et al. "All-fiber narrow band reflection grating at 1500 nm," *Electronics Letters*, Vol. 26, 1990, pp. 730-732.
17. Eggleton, B. J., Krug, P. A. and Poladian, L. "Experimental demonstration of compression of dispersed optical pulses by reflection from self-chirped optical fiber Bragg gratings," *Optics Letters*, Vol. 19, 1994, pp. 877-880.
18. Kashyap, R. (1999). "Fiber Bragg Gratings," San Diego: Academic Press.
19. Malo, B. et al. "Point-by-point fabrication of micro-Bragg gratings in photosensitive fiber using single eximer pulse refractive index modification techniques," *Electronics Letters*, Vol. 29, 1993, pp. 1668-1669.
20. D.D. Davis, T.K. Gaylord, E.N. Glytsis, S.G. Kosinski, S.C. Mettler and A.M. Vengsarkar. A. "Long-period fiber grating fabrication with focused CO2 laser pulses," *Electron. Lett*, Vol. 34, 1998, pp. 302-303.
21. Y. J. Rao, Y. P. Wang, Z. L. Ran, and T. Zhu, "Novel fiber-optic sensors based on the long-period fiber grating written by high-frequency CO2 laser pulses", *J. Lightwave Technol.*, 21(5), 1320-1327 (2003).
22. V. Grubsky and J. Feinberg, "Rewritable densification gratings in boron-doped fibers", *Opt. Lett.*, 30(11), 1279-1281 (2005).
23. V. Grubsky and J. Feinberg, "Fabrication of axially symmetric long-period fiber gratings with a carbon dioxide laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18(21), 2299-2298 (2006).
24. H. W. Lee, Y. Liu, and K. S. Chiang, "Writing of long-period gratings in conventional and photonic-crystal polarization-maintaining fibers by CO2-laser pulses", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20(2), 132-134 (2008).
25. Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P. Kazansky, and K. Hirao, "Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses", *Opt. Lett.*, 24(10), 646-648 (1999).
26. L. Drozin, P. Y. Fonjallaz, and L. Stensland, "Long-period fiber gratings written by CO2 exposure of H2-loaded standard fibres", *Electron. Lett.*, 36(8), 742-743 (2000).

27. Lee, H. W., Chiang, K. S., "CO<sub>2</sub> laser writing of long-period fiber grating in photonic crystal fiber under tension," *Optics Express*, Vol. 17, No. 6, 16 March 2009.
28. Kosinski, S.G. and Vengsarkar, A.M. "Splicer-based long-period fiber gratings," Conference on Optical Fiber Communication (OFC'98), Technical Digest 1998, pp. 278-279.
29. Hernández García, J. C. et al. "Instrumentación y diseño de una fuente de alto voltaje para fabricar rejillas de fibra óptica mediante la técnica de arco eléctrico," *Revista Mexicana de Física* **56** (3) 255–261, Junio, 2010.
30. Dianov, E. M., V. I. Karpov, M. V. Grekov, K. M. Golant, S. A. Vasiliev, O. I. Medvedkov, and R. R. Khrapko, "Thermo-induced long-period fibre gratings," *23<sup>rd</sup> European Conference on Optical Communication, Vol. 2, 1997, pp. 53-56.*
31. I. B. Sohn, N. K. Lee, H. W. Kwon, and J. W. Song, "Tunable gain-flattening filter using microbending long-period fiber gratings," *Opt. Eng.* Vol. 41, pp. 1465-1466, 2002.
32. T. Yokouchi, Y. Suzuki, K. Nakagawa, M. Yamauchi, M. Kimura, Y. Mizutani, S. Kimura, and S. Ejima, "Thermal tuning of mechanically induced long-period fiber grating," *Appl Opt* 44 (2004), 5024–5028.

## **Capítulo 2**

1. Hecht J. (2008). *Undertanding lasers. An entry-level guide*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
2. Alvarez Silva C., Calvet Pérez R. (1985) *Lasers :operacion, equipo, uso y diseño*. Mexico: Limusa.
3. Ready J. F. ready (1978) *Industrial applications of lasers*. New York : Academic.
4. Bachs L. Cuesta J. Carles N. (1988) *Aplicaciones industriales del laser*. Barcelona: Marcombo.
5. Ion J. C. (2005) *Laser processing of engineering materials*. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann
6. Mackwoo A. P., Crafer R. C., "Thermal modeling of laser welding and related processes: a literature review". *Optics & Laser Tecnology* 37 (2005), 99-115.
7. Calles Arriaga C. A., Castillo Guzmán A., Selvas Aguilar R. "Procesamiento de materiales con láser: principales aplicaciones y desarrollos recientes en manufactura avanzada" *Politecnologías*, vol.1, No1, 60-67.
8. [http://www.synrad.com/search\\_apps/Default.htm](http://www.synrad.com/search_apps/Default.htm)

## **Capítulo 3**

1. D.D. Davis, T.K. Gaylord, E.N. Glytsis, S.G. Kosinski, S.C. Mettler and A.M. Vengsarkar. A. "Long-period fiber grating fabrication with focused CO<sub>2</sub> laser pulses," *Electron. Lett*, Vol. 34, 1998, pp. 302-303.
2. Y. J. Rao, Y. P. Wang, Z. L. Ran, and T. Zhu, "Novel fiber-optic sensors based on the long-period fiber grating written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses", *J. Lightwave Technol.*, 21(5), 1320-1327 (2003).
3. V. Grubsky and J. Feinberg, "Rewritable densification gratings in boron-doped fibers", *Opt. Lett.*, 30(11), 1279-1281 (2005).
4. V. Grubsky and J. Feinberg, "Fabrication of axially symmetric long-period fiber gratings with a carbon dioxide laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18(21), 2299-2298 (2006).
5. H. W. Lee, Y. Liu, and K. S. Chiang, "Writing of long-period gratings in conventional and photonic-crystal polarization-maintaining fibers by CO<sub>2</sub>-laser pulses", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20(2), 132-134 (2008).
6. Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P. Kazansky, and K. Hirao, "Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses", *Opt. Lett.*, 24(10), 646-648 (1999).
7. Mackwoo A. P., Crafer R. C., "Thermal modeling of laser welding and related processes: a literature review". *Optics & Laser Tecnology* 37 (2005), 99-115.
8. Ion J. C. (2005) *Laser processing of engineering materials*. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann.
9. Gratzke, U., Kapadia, P. D., and Dowden, J., 1991, "Heat Conduction in High-Speed Laser Welding," *J. Appl. Phys., J. Phys. D*, 24 (1991), pp. 2125-2134.
10. P. Solana and J.L. Ocana, "A mathematical model for penetration laser welding as a free boundary problem," *Journal Physics D: Applied Physics* 30 (1997), pp.1300-1313.
11. G. Simon, U. Gratzke and J. Kroos, "Analysis of heat conduction in deep penetration welding with a time-modulated laser beam," *J Phys D* 26 (1993), pp. 862-869.
12. R. Akhter, M. Davis, J. Dowden et al., "A method for calculating the fused zone profile of laser keyhole welds," *J. Phys. D* 21 (1989), pp. 23–28.
13. C. Lampa, A.F.H. Kaplan, J. Powell and C. Magnusson, "An analytical thermodynamic model of laser welding," *Phys. D: Appl. Phys.* 30 (1997), pp. 1293–1299.
14. Yilbas, B. S. "The analysis of CO<sub>2</sub> laser cutting", *Proc. Inst. Mech. Eng. B* 211 (1997), pp. 223-232.

15. Frewin, M.R. and Scott, D.A., 1999, "Finite Element Model of Pulsed Laser Welding," Welding Research Supplement, January 1999, 15s-22s.
16. Van Vlack, Lawrence H., (1982) *Materials for engineering: Concepts and applications*. Massachusetts: Addison-wesley.
17. James P. Schaffer, J. P. et al., (1999), *The science and design of engineering materials*. Boston; Mexico City : WCB McGraw-Hill.
18. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. *Оптические постоянные природных и технических сред*. Справочник — Л.: Химия, 1984 216 С.
19. Hecht J. (2008). *Undertanding lasers. An entry-level guide*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

## **Capítulo 5**

1. James P. Schaffer, J. P. et al., (1999), *The science and design of engineering materials*. Boston; Mexico City : WCB McGraw-Hill.

# APÉNDICE A

## %MODELO MATEMÁTICO CONSIDERANDO CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y CONVECCIÓN TÉRMICA

### %TEMPERATURAS

```
Ta=300; %Temperatura ambiente
Tf=310:2270; %Temperatura final
DT=(-Ta)+Tf; %diferencia de temperatura
T=Tf.^1.61;
```

### %POTENCIA

```
P=0.5;
```

### %DIÁMETROS DE LAS FIBRAS

```
d1=0.000125;
d2=0.0002;
d3=0.00025;
d4=0.0004;
dh=0.0003;
```

### %RADIO DE LAS FIBRAS

```
r1=d1/2;
r2=d2/2;
r3=d3/2;
r4=d4/2;
rh=dh/2;
```

### %PERÍMETROS DE LAS FIBRA ÓPTICAS

```
p1=pi*d1;
p2=pi*d2;
p3=pi*d3;
p4=pi*d4;
```

### %ÁREAS DE LAS FIBRAS

```
A1=pi*(r1^2);
A2=pi*(r2^2);
A3=pi*(r3^2);
A4=pi*(r4^2);
Ah=pi*(rh^2);
```

### %ÁREAS DE LAS SUPERFICIES DE LAS FIBRAS

```
As1=p1*dh;
As2=p2*dh;
As3=p3*dh;
As4=p4*dh;
```

### %VOLÚMENES

```
v1=pi*r1^2*dh;
v2=pi*r2^2*dh;
v3=pi*r3^2*dh;
v4=pi*r4^2*dh;
```

### %COEFICIENTES

```
rho=2200; %Densidad del sílice
cp=755; %Capacidad calórica específica del sílice REVISAR EL VALOR
k=2; %Coeficiente de conductividad térmica del sílice a 1000°C
```

```

E=1.93; %Emisividad del sílice
s=0.0000000567; %Constante de Stefan-Boltzman
h=0.0024*E*T; %Coeficiente de convección
al=37955.53; %Coeficiente de absorción
a=0.76*10^-6; %Difusividad térmica
t0=(rh^2)/(4*a);

```

#### %MASA DE LA SECCIÓN CILÍNDRICA

```

m1=v1*rho;
m2=v2*rho;
m3=v3*rho;
m4=v4*rho;

```

#### %POTENCIA ABSORBIDA

```

Pa1=(P*0.7)*(1-exp(-al*d1*10));
Pa2=(P*0.7)*(1-exp(-al*d2*10));
Pa3=(P*0.7)*(1-exp(-al*d3*10));
Pa4=(P*0.7)*(1-exp(-al*d4*10));

```

#### %ENERGÍA DE CALENTAMIENTO

```

E1=cp*m1.*DT;
E2=cp*m2.*DT;
E3=cp*m3.*DT;
E4=cp*m4.*DT;

```

#### %CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

```

Cond1=(k*A1.*DT)/(sqrt(4*a));
Cond2=(k*A2.*DT)/(sqrt(4*a));
Cond3=(k*A3.*DT)/(sqrt(4*a));
Cond4=(k*A4.*DT)/(sqrt(4*a));

```

#### %CONVECCIÓN TÉRMICA

```

Conv1=As1.*DT.*h;
Conv2=As2.*DT.*h;
Conv3=As3.*DT.*h;
Conv4=As4.*DT.*h;

```

#### %RADIACIÓN TÉRMICA

```

R1=As1*h*s*E.*(Tf.^4);
R2=As2*h*s*E.*(Tf.^4);
R3=As3*h*s*E.*(Tf.^4);
R4=As4*h*s*E.*(Tf.^4);

```

#### %FACTOR GEOMÉTRICO

```

fs1=Ah/(d1*dh);
fs2=Ah/(d2*dh);
fs3=Ah/(d3*dh);
fs4=Ah/(d4*dh);

```

#### %TEMPERATURA VS TIEMPO (EVALUACIÓN DE TODOS LOS FACTORES PARA LOS DIFERENTES DIÁMETROS DE FIBRAS ÓPTICAS)

```

t1=(E1+((Cond1+Conv1+R1)*t0))/(Pa1*0.568*fs1);
t2=(E2+((Cond2+Conv2+R2)*t0))/(Pa2*0.568*fs2);
t3=(E3+((Cond3+Conv3+R3)*t0))/(Pa3*0.568*fs3);
t4=(E4+((Cond4+Conv4+R4)*t0))/(Pa4*0.568*fs4);

```

```
%GRÁFICAS
```

```
plot(t1,Tf,'-', t2,Tf,'--',t3,Tf,'-.', t4,Tf,':'),grid on  
xlabel('Tiempo [s]')  
ylabel('Temperatura [K]')  
legend('D1=125um', 'D2=200um', 'D3=250um', 'D4=400um')
```