

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
Departamento de Física



**Estudio del pivote óptimo: diseño y construcción de cavidad de láser
extendida de 670nm.**

Gabriel Andrés Riveros Oñate

Profesor Guía:

Ignacio Enrique Olivares Bahamondes

**Tesis para optar al Título Profesional de
Ingeniero Físico.**

Santiago – Chile

2017

© Gabriel Andrés Riveros Oñate, 2018.

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial Chile 3.0

**ESTUDIO DEL PIVOTE ÓPTIMO: DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DE CAVIDAD DE LÁSER EXTENDIDA DE
670nm.**

Por
GABRIEL ANDRÉS RIVEROS OÑATE

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Ignacio Olivares Bahamondes, del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora.

Dr. Raúl Labbé _____

Dr. Felipe Herrera _____

Dr. Ernesto Gramsch _____

Dr. Enrique Cerda.

Director del Departamento de Física.

Resumen

El presente trabajo tiene por finalidad el diseño y fabricación de un láser sintonizable. Se diseñaron dos láseres de diodo de cavidad externa. En el primero (diodo **Sacher**) se logró sintonizar 670,01[nm] y se estudió el efecto de la sintonización sincrónica. En el segundo láser (diodo **Toptica**) se realizó un estudio de la geometría y el efecto de la posición del pivote. Se propuso una geometría que redujera al mínimo el salto de modo. Con el primero de los láseres fabricados se logró una sintonización con un rango de ~ 40 [GHz] gracias a la sintonización sincrónica (corriente del diodo y voltaje de piezoeléctrico). Con él se realizaron mediciones de absorción en una celda de vapor de litio.

Con el otro láser se logró una longitud de onda estable de 670,01[nm], a pesar de que el diodo estaba centrado en 675[nm]. Se encontró que la geometría propuesta no resolvía el problema de salto de modos sin el uso del método de sintonía sincrónica.

Palabras claves: Diodo láser, láser sintonizable, láser de diodo de cavidad externa.

Tabla de Contenidos

Introducción	1
Capítulo 1: Teoría	3
1.1. Diodo Láser.	3
1.1.1. Recubrimiento Anti-Reflejo	4
1.2. Láser de Diodo de Cavidad Externa.	6
1.2.1. Saltos de Modos (Mode-Hopping).	8
1.2.2. Red de Difracción.	8
1.2.3. Configuración de Littrow.	10
1.2.4. Configuración de Littman-Metcalf.	11
1.3. Ecuación del Pivote.	13
Capítulo 2: Experimento	16
2.1. Diseño y Fabricación.	16
2.1.1. Láser de Cavidad Externa Sin Estudio de Pivote.	16
2.1.1.1. Conexión del Diodo y Colimación.	16
2.1.1.2. Red de Difracción y Retroalimentación Óptica.	19
2.1.1.3. Diseño de la Cavidad.	21
2.1.1.4. Controladores de Corriente y Temperatura.	24
2.1.2. Láser de Cavidad Externa Con Estudio de Pivote.	26
2.1.2.1. Conexión del Diodo y Colimación.	26
2.1.2.2. Red de Difracción y Retroalimentación Óptica.	28
2.1.2.3. Diseño de la Cavidad.	30
2.1.2.4. Controladores de Corriente y Temperatura.	33
2.2. Determinación de Parámetros α y β	34
2.2.1. Magic Box.	38
2.3. Celda de Gas de Litio para Absorción.	39
Capítulo 3: Resultados	41
3.1. Fabricación de los Láseres.	41
3.2. Resultados de Emisión del Láser Sacher.	42

3.3. Resultados de Estabilización del Láser Sacher.....	43
3.4. Resultados de Sintonización y Absorción en Celda de Vapor de Litio Neutro de Láser Sacher.....	44
3.5. Resultados de Emisión del Láser Toptica.....	46
3.6. Resultados de Estabilización del Láser Toptica.....	47
3.7. Resultados de Barrido de Láser Toptica.....	48
Capítulo 4: Análisis de Resultados.....	50
4.1. Láser Sintonizable Sacher.....	50
4.2. Láser Sintonizable Toptica.....	52
Capítulo 5: Discusión.....	53
Conclusión.	54
Referencias Bibliograficas.....	55

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Especificaciones del diodo Sacher SAL-0670-20 , longitud de onda a temperatura ambiente (25°C)	Pag.17
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del controlador de corriente Thorlabs LDC500	Pag.25
Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del controlador de corriente Thorlabs TEC2000	Pag.25
Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del controlador de corriente Thorlabs LDC205	Pag.33
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del controlador de corriente Thorlabs TED200C	Pag.34
Tabla 3.1. Valores máximos y mínimos, del voltaje de piezoeléctrico y corriente aplicada al diodo láser	Pag.45

Índice de Figuras

Figura 1.1. Esquema básico de un diodo láser y su estructura de capas semiconductoras	Pag.3
Figura 1.2. Representación gráfica de la amplificación óptica y la emisión estimulada	Pag.4
Figura 1.3. Ejemplo de un revestimiento anti-reflejo de monóxido de silicio	Pag.5
Figura 1.4. Ejemplo de contribuciones de ganancias en el diodo láser con cavidad externa	Pag.7
Figura 1.5. Esquema de funcionamiento en modo único, donde la curva roja representa la ganancia en la cavidad	Pag.8
Figura 1.6. Diagrama de rayos sobre una red de difracción, donde d corresponde a la distancia entre dos líneas de la red de difracción	Pag.9
Figura 1.7. Diagrama de rayos (a) para el caso en que el rayo de incidencia y difractado se ubican en distintos lados respecto a la normal y (b) el caso en que ambos rayos estén al mismo lado de la normal	Pag.10
Figura 1.8. Esquema básico de la cavidad de Littrow	Pag.10
Figura 1.9. Diagrama básico de cavidad de Littman-Metcalf	Pag.12

Figura 1.10. Geometría del punto de pivote. L es el largo de la cavidad externa, D es la distancia más corta entre el punto de pivote (PP) y la línea del láser, R es la distancia más corta entre el punto de pivote y el plano de la red de difracción. DLEP es el punto de emisión del diodo láser	Pag.13
Figura 2.1. (a) Encapsulado tipo TO9 de Diodo láser. (b) Conexión de diodo láser tipo B, (c) Vista posterior de diodo láser	Pag.17
Figura 2.2. Cable de conexión y protección antiestática Thorlabs SR9B-DB9	Pag.18
Figura 2.3. Montura de colimación Thorlabs LDH9-P2 . (a) Vista 3D, (b) Esquema funcional de la montura	Pag.19
Figura 2.4. Eficiencia de la red de difracción de Edmund Optics en función de la longitud de onda, para ambos planos de polarización y promedio	Pag.20
Figura 2.4. Vista 3D de la montura Thorlabs KM100B con doble ajuste de precisión	Pag.20
Figura 2.5. Vista Superior de los bloques que conforman la base del sistema láser. Los agujeros azules corresponden a hilos del tipo 8-32" (M4 x 0,7) para unir ambos bloques y los rojos de M3 x 0,5 para montar la óptica del sistema	Pag.22
Figura 2.6. (a) Vista lateral de los bloques que conforman la base del sistema láser. (b) Tarugo de aislación termina	Pag.23
Figura 2.7. Vista superior de la cavidad de Littrow con la óptica montada y representación del haz emitido	Pag.24

Figura 2.8. Montura de colimación Thorlabs LTN330-B . (a) Vista 3D, (b) Esquema y dimensiones de la montura	Pag.26
Figura 2.9. Diagrama de distancias relativas entre emisor (puntos A1, A2 y B) y lente. B representa la distancia óptima para la colimación, la cual se ubica entre los puntos A1 y A2 que representan los límites de ajuste de la montura Thorlabs LTN330-B	Pag.27
Figura 2.10. Montura en forma de “T” para colimador Thorlabs LTN330-B	Pag.28
Figura 2.11. Montura con flexure para la red de difracción con piezoeléctrico AE0203D08F incorporado	Pag.29
Figura 2.12. Eficiencia de la red de difracción de Richardson Gratings en función de la longitud de onda, para ambos planos de polarización	Pag.30
Figura 2.13. Bloque superior del sistema láser. (a)Vista superior del bloque y (b) Vista lateral del flexure de ajuste vertical	Pag.31
Figura 2.14. Esquema completo de la vista superior del sistema láser completo	Pag.32
Figura 2.15. Esquema del interferómetro Michelson con sus brazos desbalanceados, utilizado para determinar el cambio en la frecuencia del láser. DL es el láser diodo, M1 y M2 son los espejos situados a distancias L1 y L2 respectivamente del divisor de haz (BS), y PD el fotodiodo	Pag.35

Figura 2.16. Señal del interferómetro Michelson (curva roja) realizada sobre diodo láser de 780[nm] para probar el método de medición, la señal de la corriente (curva azul) fue obtenida de la salida de control de corriente, del controlador LDC500 con un coeficiente de 50 [mA/V] Pag.37

Figura 2.17. Señal del interferómetro Fabry Perot (curva roja) para el láser **Sacher SAL-0670-20** retroalimentado y con escaneo del piezoeléctrico, y la señal de la modulación del piezoeléctrico (curva azul) Pag.37

Figura 2.18. Esquema básico de amplificador inversor utilizado, con ganancia R_f/R . Para el caso particular del experimento se utilizó una resistencia de 22[kOhm] y un potenciómetro de 10[kOhm] Pag.38

Figura 2.18. Montaje experimental para realizar la absorción de litio. DL corresponde al diodo láser, HP al Heat Pipe, PD al fotodiodo y FPI al interferómetro Fabry Perot Pag.39

Figura 2.19. Imagen real del Heat Pipe. Se observa el horno cerámico que recubre el cuerpo principal en el cual se ubica la cámara de vacío y eje principal del sistema por el cual pasara el láser. También se observa el sistema de refrigeración en los extremos del horno cerámico el cual se encarga de mantener el gas en un volumen controlado y lejos de las ventanas Pag.40

Figura 3.1. Láser diseñado y confeccionado considerando el estudio del pivote óptimo, con el diodo láser **Toptica** Pag.41

Figura 3.2. Láser diseñado y confeccionado sin considerar la posición del pivote, con el diodo láser **Sacher** Pag.42

Figura 3.3. Curva de potencia en función de la corriente aplicada al diodo láser **Sacher SAL-0670-20** con (curva roja) y sin (curva negra) retroalimentación óptica Pag.43

Figura 3.4. Espectro del láser centrado en 670,01[nm] logrados con la geometría estudiada para el diodo láser **Toptica Modelo**, con una temperatura de 13,5°C estable y una corriente de 91,2[mA] Pag. 44

Figura 3.5. Resultados de absorción en litio con diodo láser Sacher. La línea azul corresponde a la señal del fotodiodo (PD) en el cual se observan las líneas de absorción del litio, la línea verde corresponde a la transmisión del interferómetro Fabry-Pérot (FPI), la línea roja corresponde al voltaje aplicado al piezoeléctrico (VPZT) que se encuentra en contra fase con la corriente aplicada al diodo láser, que corresponde a la línea cian. El láser fue configurado con valores operacionales iniciales de $I_{LD} = 91,2 [mA]$, $T_{LD} = 13,5 ^\circ C$ y $V_{PZT} = 20 [V]$ Pag.46

Figura 3.6. Curva de potencia en función de la corriente aplicada al diodo láser **Toptica LD-0675-0035-AR-1** con (curva roja) y sin (curva negra) retroalimentación óptica Pag.47

Figura 3.7. Espectro del láser centrado en 670,01[nm] logrados con la geometría estudiada para el diodo láser **Toptica Modelo SP2-USB**, con una temperatura de 9,6°C estables y una corriente de 108,5[mA] Pag.48

Figura 3.8. Resultados del barrido realizado en el láser Toptica, mediante la modulación del piezoeléctrico de la red de difracción. La línea azul corresponde a la señal del fotodiodo (PD) en el cual se observan saltos de modo, la línea verde corresponde a la transmisión del interferómetro Fabry-Pérot (FPI) y la línea roja corresponde al voltaje aplicado al piezoeléctrico (VPZT). El láser fue configurado con valores operacionales iniciales de $I_{LD} = 108.5 [mA]$, $T_{LD} = 9,6 ^\circ C$ y $V_{PZT} = 27,4 [V]$ Pag.49

Figura 4.1. (a) Resultados de absorción obtenido anteriormente en el laboratorio, con el láser comercial EOSI. (b) Resultados de absorción obtenidos con el láser fabricado con el diodo láser marca Sacher Pag.51

Introducción.

Los diodos láser de cavidad externa (en inglés ECDL que significa External Cavity Diode Laser) en la actualidad son altamente usados en trabajos de espectroscopia, metrología y física atómica, producto de que es posible reducir el ancho de banda de estos y adicionalmente permiten variar de forma continua su longitud de onda.

La construcción de láseres de diodo sintonizable ha sido estudiada por varios autores, y en el laboratorio de óptica láser se han construido con éxito láseres sintonizables en torno a los 780[nm], y se ha intentado la fabricación de un láser de diodo sintonizable de cavidad externa en torno a los 670[nm]. La construcción de los láseres en 670[nm] es mucho más difícil que la de uno de 780[nm].

En este trabajo se desarrolló una metodología para la fabricación de láseres. Los primeros láseres de cavidad externa de 670[nm] construidos en el laboratorio óptica láser no tenían recubrimiento anti-reflejo y se lograron sintonizar, pero no en torno a la longitud de onda deseada. Para el presente trabajo se decidió experimentar con diodos láser con recubrimiento anti-reflejo, para poder sintonizar el láser sin restricciones.

En una primera instancia se desarrolló un láser con un diodo de la marca **Sacher** centrado en 670[nm], con una montura comercial de marca **Thorlabs** para la colimación del láser y otra también de marca **Thorlabs** para la instalación de la red

de difracción. En el láser Sacher no se consideró el estudio de la geometría de la cavidad y se implementó el método de sintonización sincrónica (*S. Dutta, D.S. Elliott, Y.P Chen*)

En el caso del segundo láser se utilizó un diodo de la marca **Toptica** montado en un colimador de la marca **Thorlabs** que facilita este proceso y es de menor tamaño. La colimación del láser es esencial para la retroalimentación del sistema y esta montura más reducida hace posible llevar a cabo el diseño con la geometría propuesta. Para encontrar la geometría se estudió y se buscó la posición óptima para el pivote de la cavidad, para lograr un mayor rango libre de saltos de modo. Experimentalmente fue necesario fabricar monturas y piezas mecánicas necesarias. Se estudió y fabricaron monturas tipo “flexure” para conseguir los ajustes deseados en el sistema.

Capítulo 1: Teoría.

1.1. Diodo Láser.

El diodo láser es un dispositivo opto electrónico similar a un led, pero que bajo las condiciones adecuadas emite luz coherente.

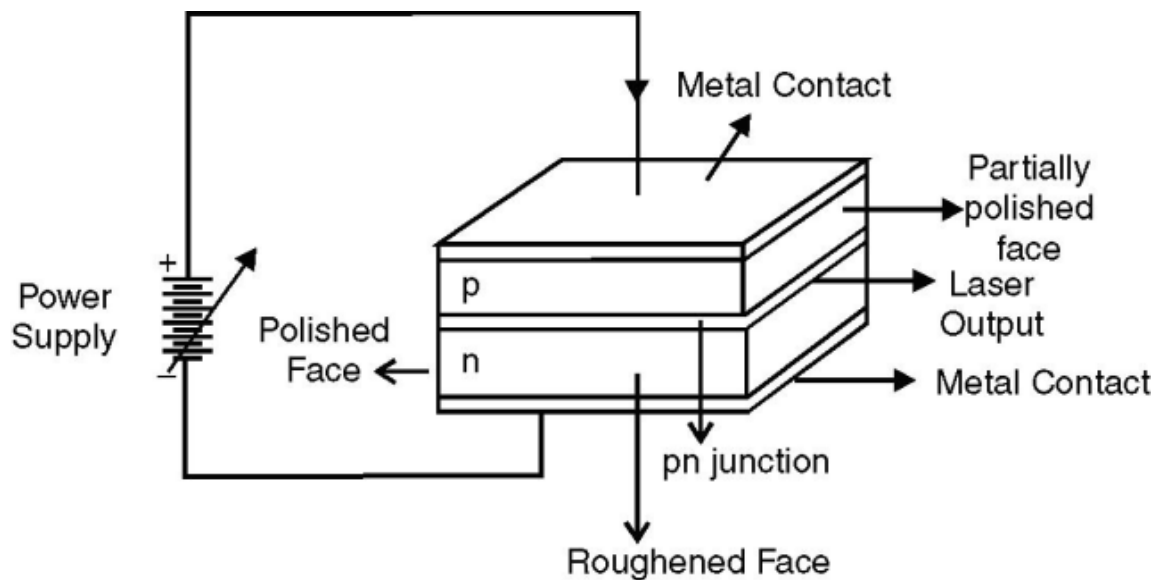


Figura 1.1. Esquema básico de un diodo láser y su estructura de capas semiconductoras.

Para lograr esta emisión láser se requiere de una inyección de corriente a través de la región activa del diodo entre los estratos semiconductores, una unión PN. La región activa posee una forma de lámina delgada con un lado totalmente reflectante,

logrando una unión PN de grandes dimensiones con sus caras exteriores paralelas y reflectantes. Esta característica favorece la recombinación de los electrones y los huecos, liberando energía como fotones. Este proceso puede ser espontáneo, pero también puede ser estimulado por fotones incidentes, produciendo el efecto de amplificación óptica, estimulando la generación de fotones de igual longitud de onda, misma fase y dirección de propagación.

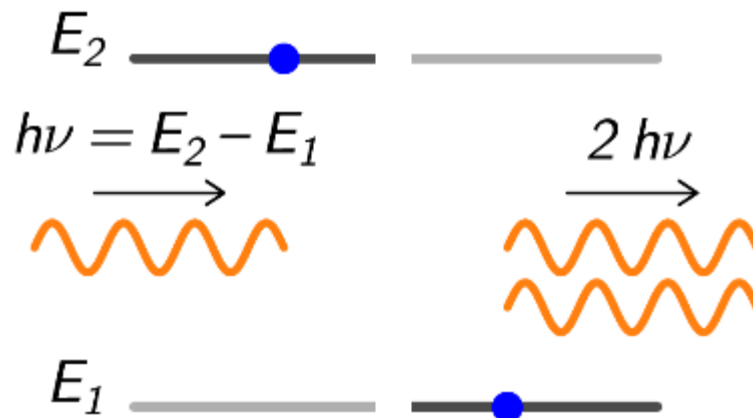


Figura 1.2. Representación gráfica de la amplificación óptica y la emisión estimulada.

1.1.1. Recubrimiento Anti-Reflejo

El recubrimiento de anti-reflejo es aplicado en la salida del diodo láser reduciendo la reflectividad de esta lo reduce en gran medida la emisión estimulada en el láser, haciendo necesaria una retroalimentación óptica para obtener la emisión láser. Por otro lado, este efecto es beneficioso para el desarrollo de láseres de frecuencia única, ya que reducen en gran medida la contribución de la cavidad interna, favoreciendo así la estabilidad del láser y aumentando su capacidad de

sintonización libre de saltos de modo (ver sección 1.2.1).

Generalmente el recubrimiento anti-reflejo es una capa delgada de monóxido de silicio (SiO), este efecto es resultado de la interferencia de los rayos reflejados por las interfaces. De tal modo que si se cumplen las condiciones necesarias para una interferencia destructiva los rayos reflejados se anularán y se eliminará el reflejo.

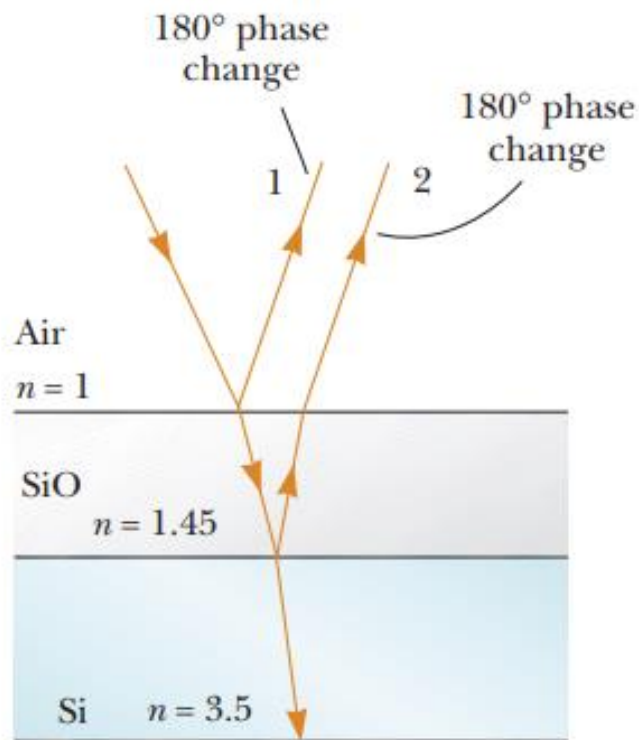


Figura 1.3. Ejemplo de un revestimiento anti-reflejo de monóxido de silicio.

Considerando el ejemplo de la Fig.1.3, donde ambos rayos reflejados sufren un cambio de fase de 180° por lo tanto para tener un mínimo en la reflexión la diferencia de camino óptico recorrido debe ser de $\lambda_n/2$, donde λ_n es la longitud de onda en el SiO. Entonces para un mínimo se debe cumplir que:

$$2t = \frac{\lambda}{2n} \quad (1.1)$$

Donde t es el grosor de la superficie de SiO. De este modo podemos decir que para una longitud de onda de 670[nm] el grosor debe ser de 115,51[nm].

1.2. Láser de Diodo de Cavity Externa.

Los láseres de cavidad externa (ECDL por sus siglas en inglés) tienen un amplio uso en la física óptica y atómica. Básicamente estos están confeccionados con un láser diodo semiconductores eficientes, acoplado a una cavidad externa que incorpora una red de difracción como elemento selectivo de longitud de onda, con lo que luego se obtiene una retroalimentación óptica selectiva en frecuencia para el láser. Este concepto de retroalimentación selectiva de frecuencia permite que el láser logre un ancho de banda estrecho (narrow linewidth), una frecuencia única y la capacidad de sintonizar.

Como ya fue mencionado la retroalimentación se obtiene a través de una red de difracción, que puede ser dispuesta en dos configuraciones, de Littrow o de Littman-Metcalf.

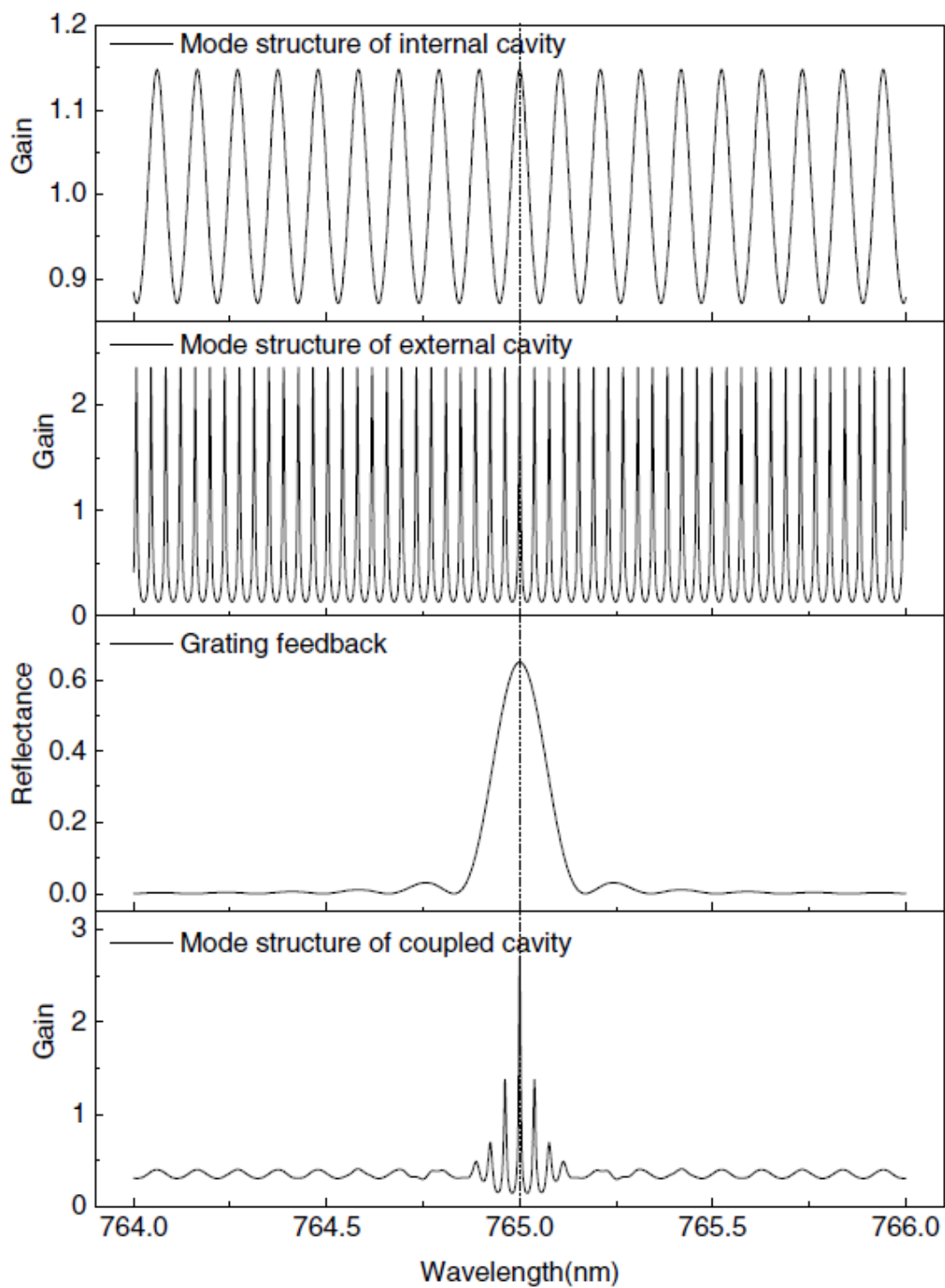


Figura 1.4. Ejemplo de contribuciones de ganancias en el diodo láser con cavidad externa.

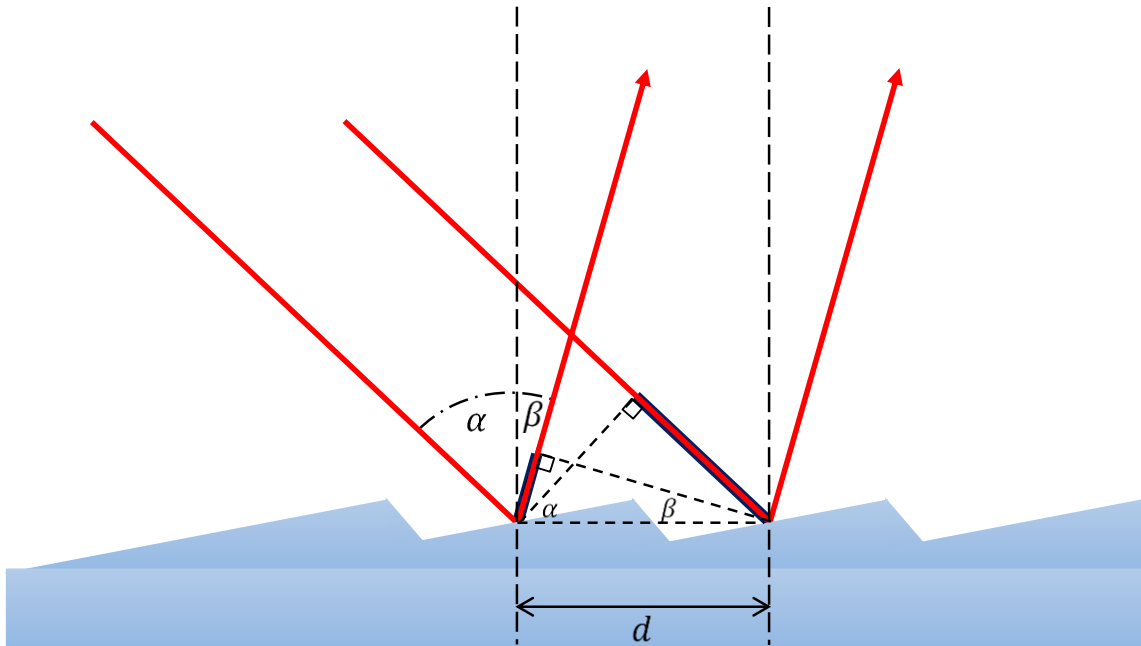


Figura 1.6. Diagrama de rayos sobre una red de difracción, donde d corresponde a la distancia entre dos líneas de la red de difracción.

Donde m es un número entero, correspondiente al orden de refracción, d la distancias entre líneas y λ la longitud de onda. El signo de la ecuación dependerá del lado donde se ubiquen los rayos de incidencia y difractados con respecto a la normal de la red, si ambos están al mismo lado de la normal debemos utilizar el signo positivo (+) y en el caso contrario el negativo (-).

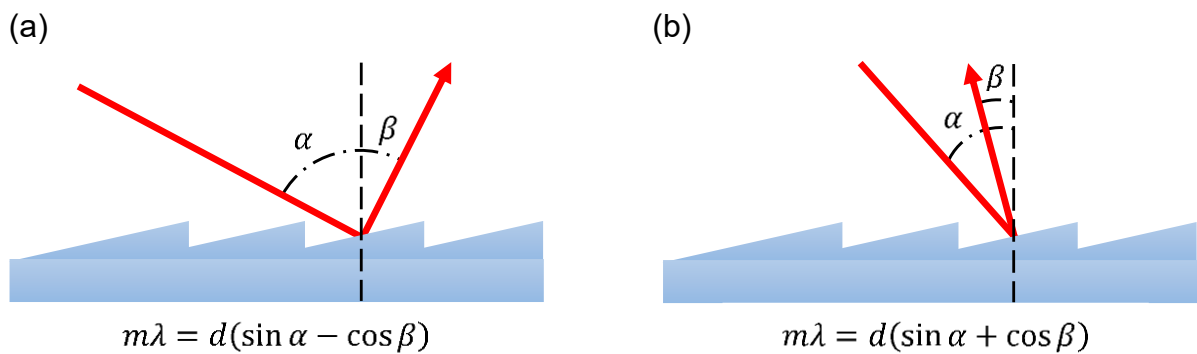


Figura 1.7. Diagrama de rayos (a) para el caso en que el rayo de incidencia y difractado se ubican en distintos lados respecto a la normal y (b) el caso en que ambos rayos estén al mismo lado de la normal.

1.2.3. Configuración de Littrow.

La configuración de Littrow consiste en alinear la red de difracción de tal modo que la difracción de primer orden retroalimente el sistema, mientras que la difracción de orden cero es reflejada, siendo este el haz emitido (Fig. 1.8).

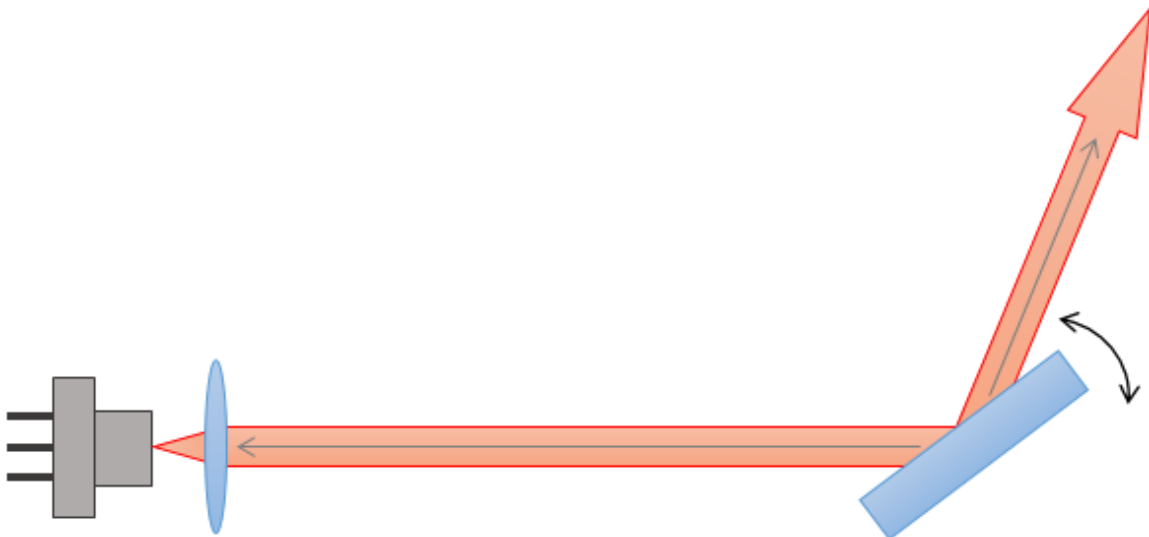


Figura 1.8. Esquema básico de la cavidad de Littrow.

Para estar en la configuración de Littrow la red de difracción debe ser posicionada de tal manera que:

$$\alpha = \beta \quad (1.3)$$

Donde α es el ángulo de incidencia β el ángulo de refracción, en este caso el de primer orden (ver Fig. 1.7 (b)). La longitud de onda dependerá de la variación del ángulo α , por lo cual es posible obtener una precisa sintonización realizando pequeños cambios en este.

$$\lambda = 2d \sin \alpha \quad (1.4)$$

Esta configuración entrega una alta eficiencia y una alta potencia en la salida del láser, pero el principal problema son los saltos de modo (mode-hopping) y el desplazamiento angular del rayo de salida cuando la red es ajustada.

1.2.4. Configuración de Littman-Metcalf.

A diferencia de la geometría de Littrow, esta configuración mantiene la red fija y agrega un espejo el cual se posiciona en el primer orden de refracción, el cual refleja este haz de vuelta a la red de difracción donde es difractado nuevamente, esta vez hacia el diodo láser generando la retroalimentación óptica. Análogamente a lo ocurrido en la configuración de Littrow el haz de salida corresponde al orden cero de difracción. (Ver Fig. 1.9)

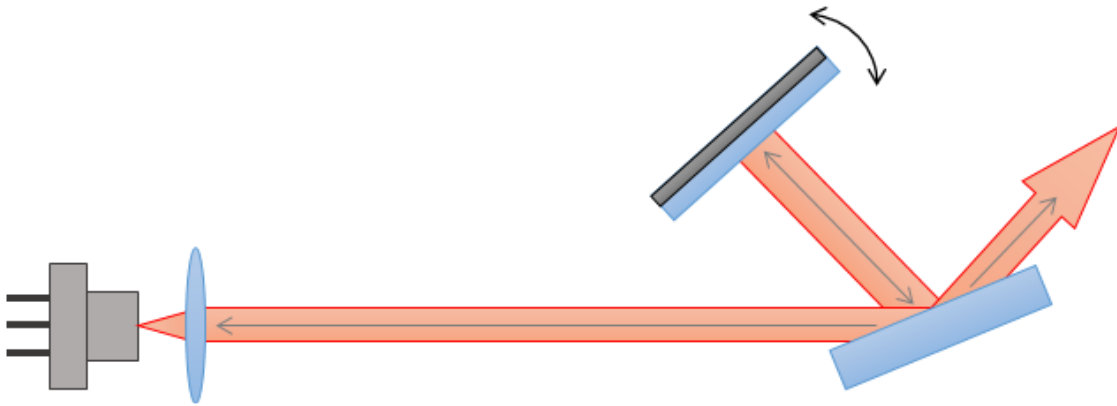


Figura 1.9. Diagrama básico de cavidad de Littman-Metcalf.

Esta configuración tiene más pérdidas en comparación con la cavidad de Littrow, debido a que el haz pasa dos veces por la red de difracción, perdiendo el orden cero de difracción de la luz que retorna del espejo a la red. Entonces la potencia de salida del láser tiende a ser más baja, pero al poseer la red de difracción fija se obtiene un mayor rango libre de saltos de modo. Esto último debido al desplazamiento sincrónico de los modos de la cavidad y la curva de ganancia, que se logra por su geometría que consiste en que el espejo pivotea en el punto donde se interseca el plano de la red con el plano frontal del diodo láser.

1.3. Ecuación del Pivote.

Como fue mencionado anteriormente, una parte fundamental en un láser de cavidad externa es la red de difracción y como se mueve esta para lograr cambios de longitud de onda sin saltos de modo. Es por esta razón que se propone la geometría que se observa en la Fig. 1.10.

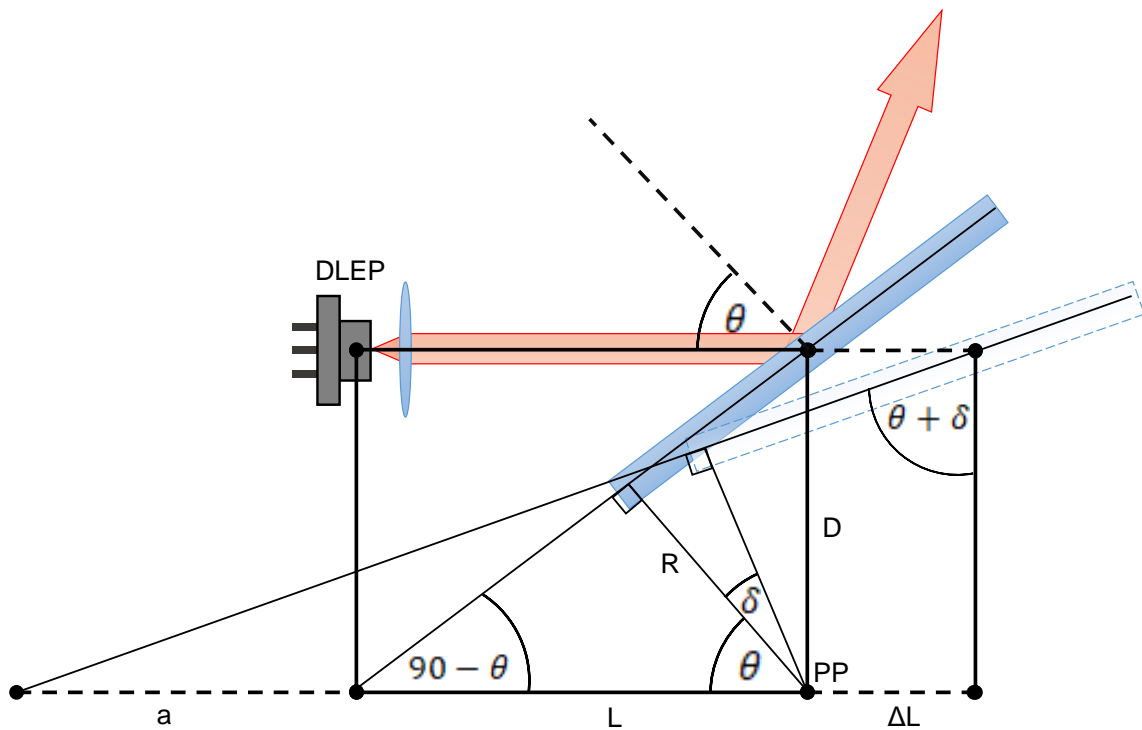


Figura 1.10. Geometría del punto de pivote. L es el largo de la cavidad externa, D es la distancia más corta entre el punto de pivote (PP) y la línea del láser, R es la distancia más corta entre el punto de pivote y el plano de la red de difracción. DLEP es el punto de emisión del diodo láser.

La ecuación del punto de pivote exacto obtenida de la Fig. 1.10 es:

$$\tan(\theta + \delta) = \frac{a + L + \Delta L}{D} \quad (1.5)$$

Y

$$\Delta L = D \tan(\theta + \delta) - \frac{R}{\cos(\theta + \delta)} \quad (1.6)$$

Realizando una expansión de primer orden para delta pequeños obtenemos

$$\Delta L = \frac{\delta}{\cos^2 \theta} (D - R \sin \theta) \quad (1.7)$$

Con $\sin(\theta) = R/D$ y luego de algunos arreglos a la Ec. 1.7 obtenemos

$$\Delta L = D\delta \quad (1.8)$$

O bien

$$\Delta L = \frac{L}{\tan \theta} \delta \quad (1.9)$$

Por otro lado, sabemos que el cambio de la longitud de onda producto de pequeñas variaciones en el largo de la cavidad está dada por:

$$\Delta \lambda_L = \frac{2}{N} \Delta L \quad (1.10)$$

Donde N es el número entero de medias longitudes de onda dentro de la cavidad de largo L. De esta manera reemplazando la Ec. 1.9 en la Ec. 1.10 tenemos:

$$\Delta \lambda_L = \frac{\lambda}{\tan \theta} \delta \quad (1.11)$$

El cambio de longitud de onda producto de la rotación de la red de difracción está dado por la siguiente expresión:

$$\Delta \lambda_G = 2d \sin(\theta + \delta) - 2d \sin \theta \quad (1.12)$$

Luego de una expansión de primer orden obtenemos:

$$\Delta\lambda_G = 2d\delta\cos\theta \quad (1.13)$$

Y considerando una configuración de Littrow (Ec. 1.4) tenemos:

$$\Delta\lambda_L = \Delta\lambda_G \quad (1.14)$$

Entonces bajo esta configuración y geometría el cambio en la longitud de onda producto del giro de la red de difracción será igual al producido por el cambio en el largo de la cavidad, es decir, un cambio sincrónico.

Capítulo 2: Experimento.

2.1. Diseño y Fabricación.

Este trabajo contempla la fabricación de dos láseres de cavidad externa con una configuración de Littrow, uno con estudio de la posición del punto de pivote y otro sin este estudio.

Además, por primera vez se utilizaron diodos láser con recubrimiento anti-reflejo para obtener una mayor estabilidad y mayor rango libre de saltos de modo, siguiendo la línea de diversos estudios.

2.1.1. Láser de Cavidad Externa Sin Estudio de Pivote.

Primero se realizó el estudio y diseño para un láser de cavidad externa convencional sin estudio de su geometría, utilizando distintas monturas comerciales.

2.1.1.1. Conexión del Diodo y Colimación.

Para la fabricación de este láser se utilizó el diodo **Sacher SAL-0670-20**, un diodo láser centrado en 670 [nm] con un recubrimiento anti-reflejo (AR). Este diodo posee una conexión del tipo B (Ver Fig. 2.1) y sus características son las siguientes:

Longitud de Onda:	670 [nm]
Corriente Máxima:	110 [mA]
Header:	9 [mm] (TO9)
Tipo de Conexión:	Style B

Tabla 2.1. Especificaciones del diodo *Sacher SAL-0670-20*, longitud de onda a temperatura ambiente (25°C).

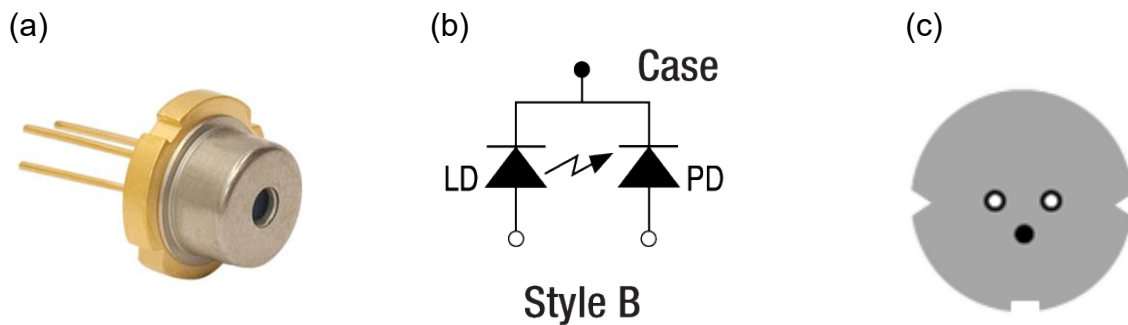


Figura 2.1. (a) Encapsulado tipo TO9 de Diodo láser. (b) Conexión de diodo láser tipo B, (c) Vista posterior de diodo láser.

A diferencia de trabajos anteriores realizados en el laboratorio, para conectar el diodo se utilizó el cable **Thorlabs SR9B-DB9**, el cual simplifica la fabricación del láser ya que incluye toda la electrónica de seguridad para prevenir daños en el diodo láser producto de descargas electroestáticas.



Figura 2.2. Cable de conexión y protección antiestática **Thorlabs SR9B-DB9**.

Una vez conectado y energizado el diodo con el controlador de corriente **Thorlabs LDC500** (capítulo 2.1.1.5) se montó el diodo junto a la lente esférica con una distancia focal de 2.75[mm] (**Lightpath 355392B-00-MT**), en la montura de colimación **Thorlabs LDH9-P2**. Esta montura posee un ajuste de precisión (2/16" – 100), con el cual se logró ajustar el lente para focalizar el haz a una distancia de 1.5 [m], con el fin de obtener la colimación deseada.

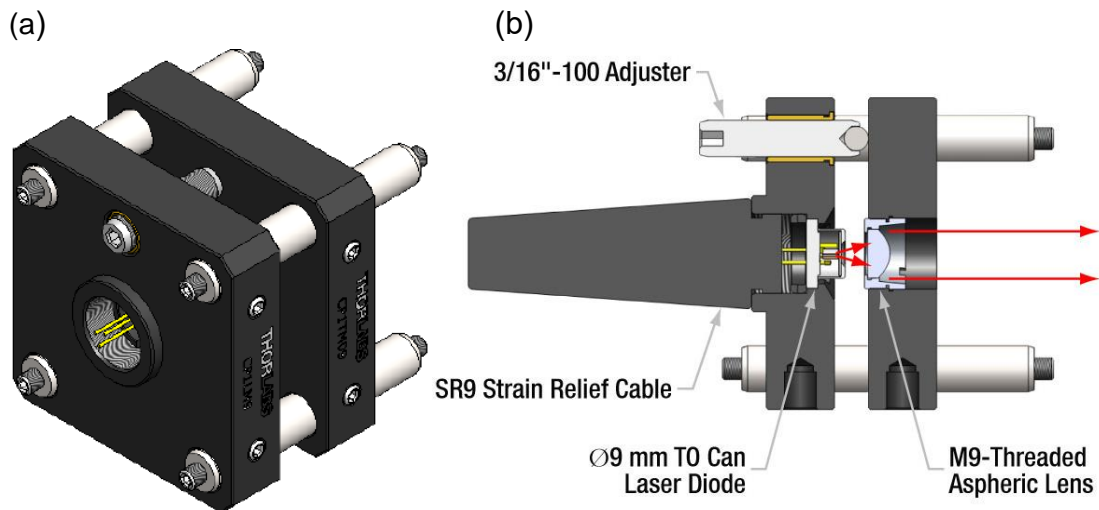


Figura 2.3. Montura de colimación **Thorlabs LDH9-P2**. (a) Vista 3D, (b) Esquema funcional de la montura.

2.1.1.2. Red de Difracción y Retroalimentación Óptica.

Con el haz previamente conectado y correctamente colimado, se estudió el proceso de retroalimentación óptica. Para esto se utilizó la red de difracción **Edmund Optics** de **1800 líneas/mm**.

Considerando la ecuación de la configuración de Littrow (Ec. 1.3) podemos determinar el ángulo con el cual debe incidir el láser para obtener la retroalimentación deseada:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right) \quad (2.1)$$

De esta manera se determinó que el ángulo debe ser de 37.09° para obtener la retroalimentación deseada. Para montar la red de difracción se utilizó una montura **Thorlabs KM100B** con dos ajustes de precisión, junto a el piezoeléctrico **AE0203D08F** (Manufacturado por **NEC Corporation**) para posteriormente poder

realizar el escaneo de frecuencia.

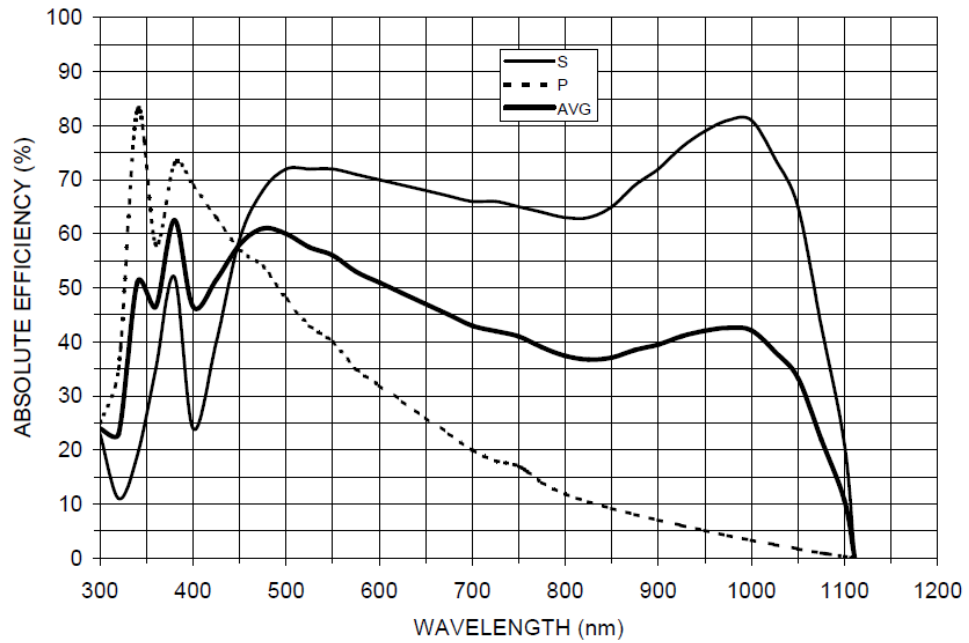


Figura 2.4. Eficiencia de la red de difracción de **Edmund Optics** en función de la longitud de onda, para ambos planos de polarización y promedio.

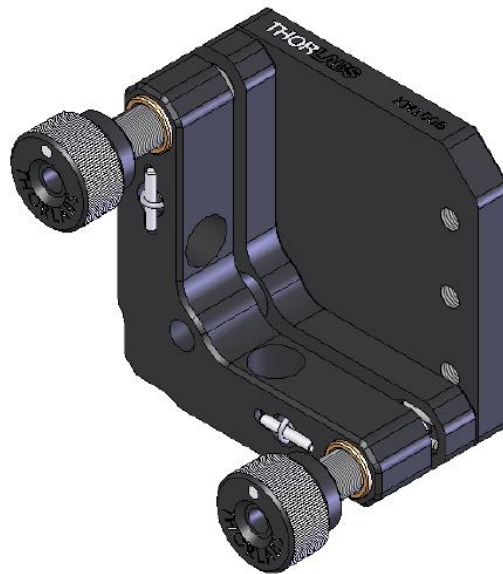


Figura 2.4. Vista 3D de la montura **Thorlabs KM100B** con doble ajuste de precisión.

2.1.1.3. Diseño de la Cavity.

El láser estará conformado por dos bloques macizos de aluminio, en los cuales se montará la óptica y los componentes necesarios para el funcionamiento del láser. Ambos bloques serán de aluminio para favorecer la transferencia de calor y por su fácil manipulación.

El primer bloque, y más grande, cumple la función de asilar el sistema y desempeñar como un sumidero de calor, mientras que el segundo bloque, un tanto más pequeño y delgado, será sobre el que se montará directamente la cavity de Littrow. Entre ambos bloques se dispondrá un peltier que junto al controlador de temperatura (ver sección 2.1.1.4) se encargarán de bajar y estabilizar la temperatura del diodo láser, por lo que el peltier enfriará el bloque superior y disipará el calor en el bloque inferior.

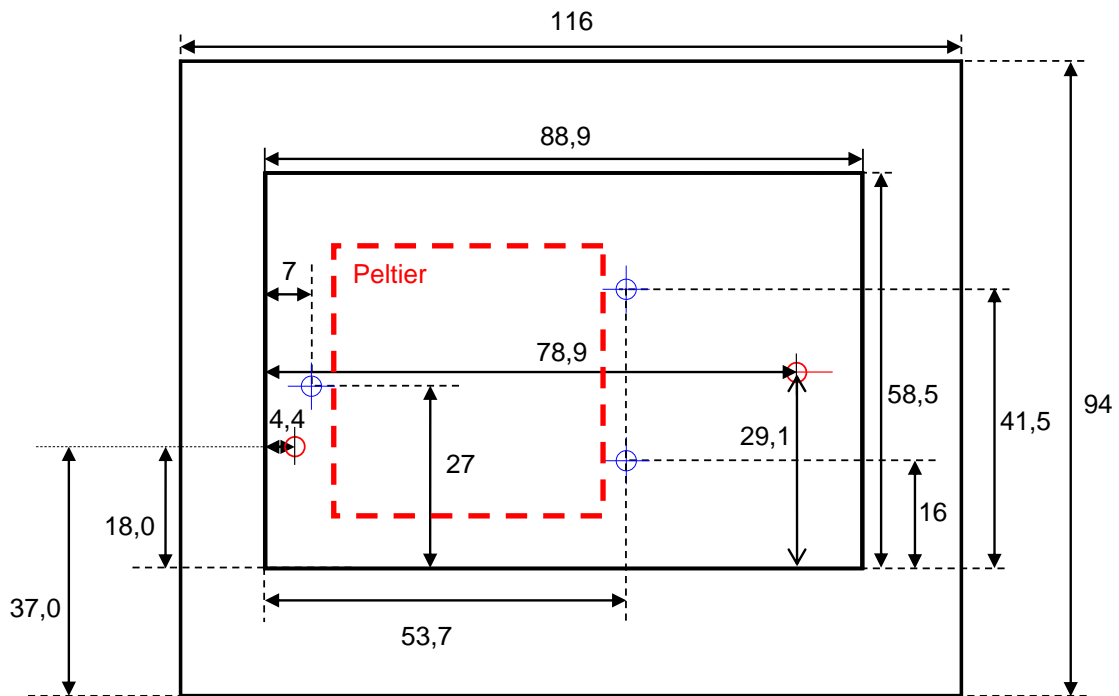


Figura 2.5. Vista Superior de los bloques que conforman la base del sistema láser. Los agujeros azules corresponden a hilos del tipo 8-32" (M4 x 0,7) para unir ambos bloques y los rojos de M3 x 0,5 para montar la óptica del sistema.

Ambos bloques estarán unidos por tres pernos, que irán desde el bloque inferior hasta el superior, para lo cual se diseñaron "tarugos" de PVC para así aislar térmicamente ambas placas entre sí.

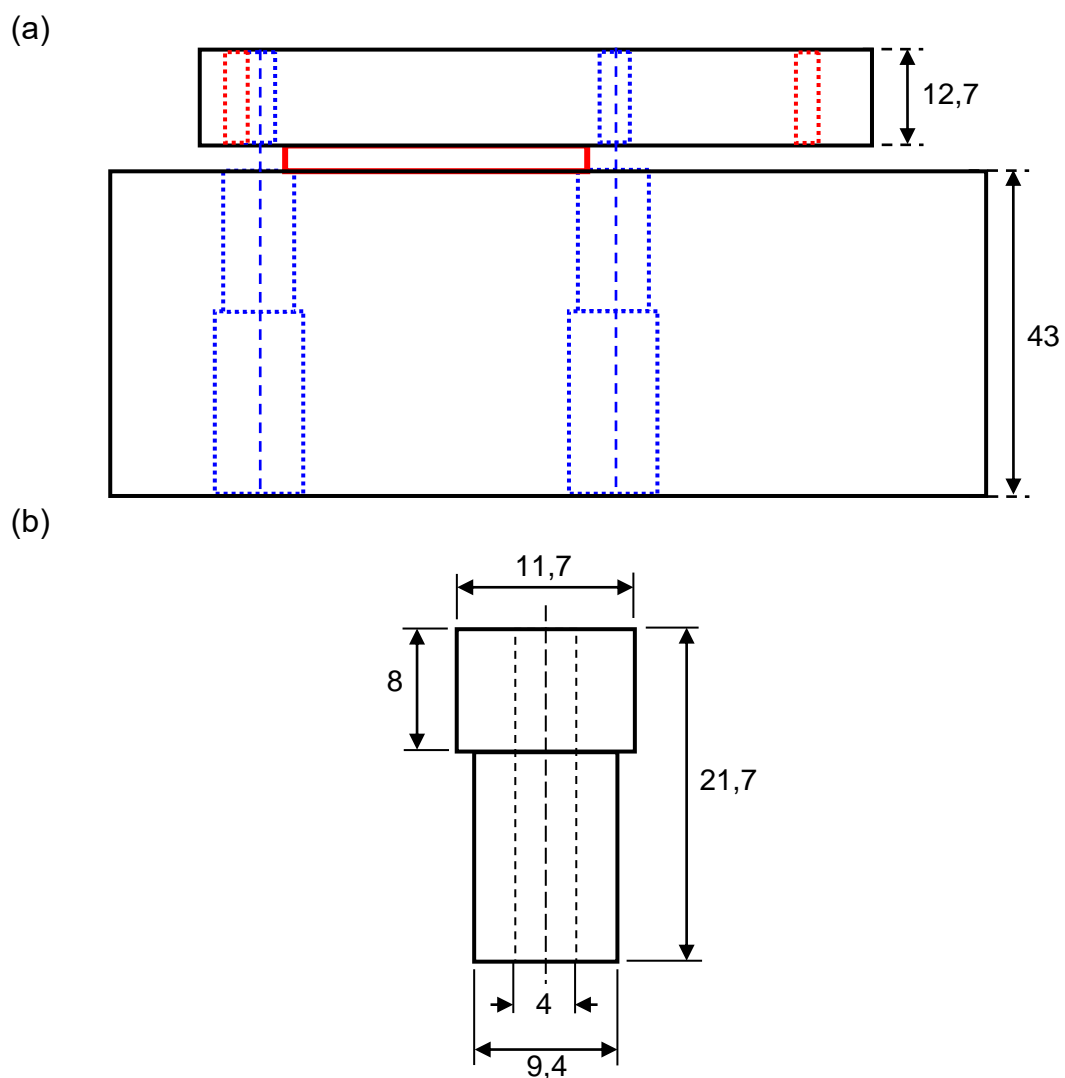


Figura 2.6. (a) Vista lateral de los bloques que conforman la base del sistema láser. (b) Tarugo de aislación termina.

Finalmente se integraron las monturas y los elementos ópticos (Fig. 2.3 y 2.4) a los bloques de montaje diseñados.

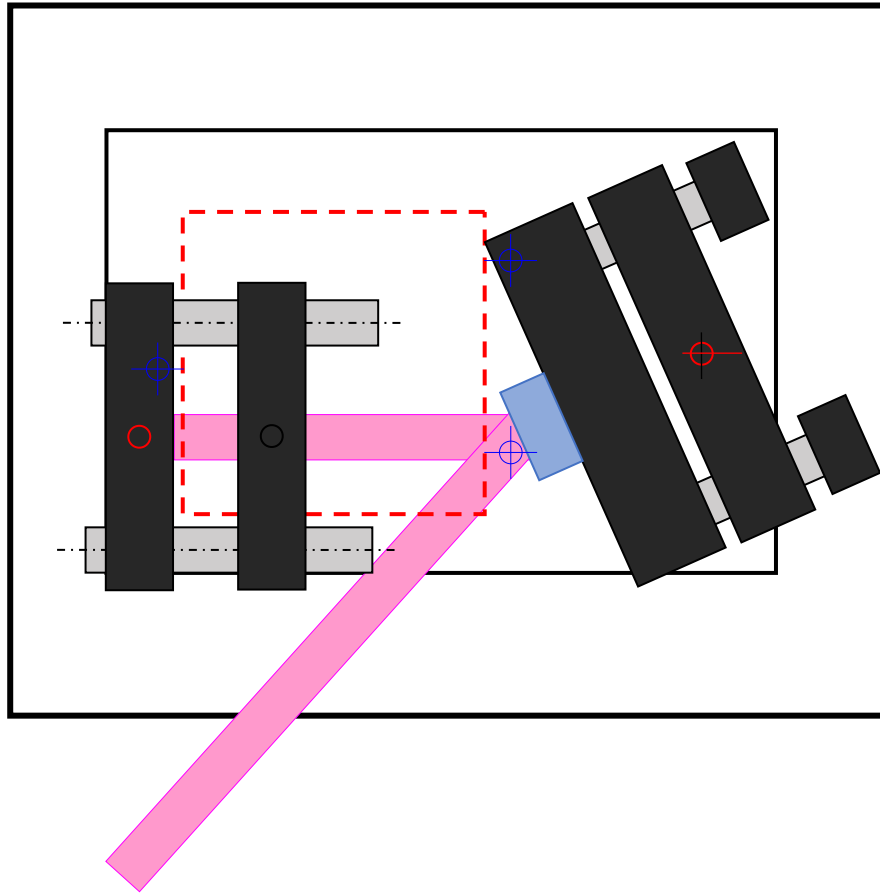


Figura 2.7. Vista superior de la cavidad de Littrow con la óptica montada y representación del haz emitido.

2.1.1.4. Controladores de Corriente y Temperatura.

Para controlar la corriente y la temperatura se utilizaron los controladores **Thorlabs LDC500** y **TEC2000**. El primero de estos se conectó directamente al diodo mediante el cable **Thorlabs SR9B-DB9** (Fig. 2.2), y las características de este controlador son las siguientes:

Rango de Control (Continuo):	0 a + 500 [mA]
Exactitud:	100 [uA]
Exactitud de Limite de Corriente:	+ 1.5 [mA]
Tipo de Conector para Diodo Láser:	DB9 Hembra
Coeficiente de Modulación:	50 mA/V
Tipo de Conector para Modulación:	BNC
Tipo de Conector del Control de Corriente de Salida:	BNC
Máximo Consumo:	30 W
Dimensiones:	5.8" x 2.8" x 12.5"

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del controlador de corriente **Thorlabs LDC500**.

Como se observa en la tabla 2.2, este controlador posee una entrada de para modular la corriente suministrada al diodo láser, y una salida para monitorear dicha corriente.

Para bajar y estabilizar la temperatura del sistema se utilizó el controlador **Thorlabs** ya mencionado junto a el termistor **TH10K** y el peltier **Melcor CP1.4-127-045L**.

Rango de Corriente:	-2A a 2A
Resolución de la Corriente:	1mA
Máxima Potencia de Salida:	12 W
Tipo de Conector:	DB9 Macho
Rango de Control (Termistor):	10 a 20k
Estabilidad de Temperatura (Termistor):	< 2°
Dimensiones:	5.8" x 2.8" x 12.5"

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas del controlador de corriente **Thorlabs TEC2000**.

2.1.2. Láser de Cavidad Externa Con Estudio de Pivote.

En la fabricación de este sistema láser se consideró la geometría expuesta en el **Capítulo 1.3** para la fabricación de la cavidad.

2.1.2.1. Conexión del Diodo y Colimación.

En este sistema se utilizó el diodo láser **Toptica LD-0675-0035-AR-1**, el cual también posee recubrimiento **AR** y conexión del tipo B (Fig. 2.1 (b)). Este diodo está centrado en 675[nm], por lo que se debe forzar y bajar su temperatura para lograr estabilizarlo en torno a los 670[nm]. Como el tipo de conector es el mismo al utilizado en el otro sistema, se utilizó el mismo cable **Thorlabs** (Fig. 2.2) el cual incluye la protección necesaria para el diodo.

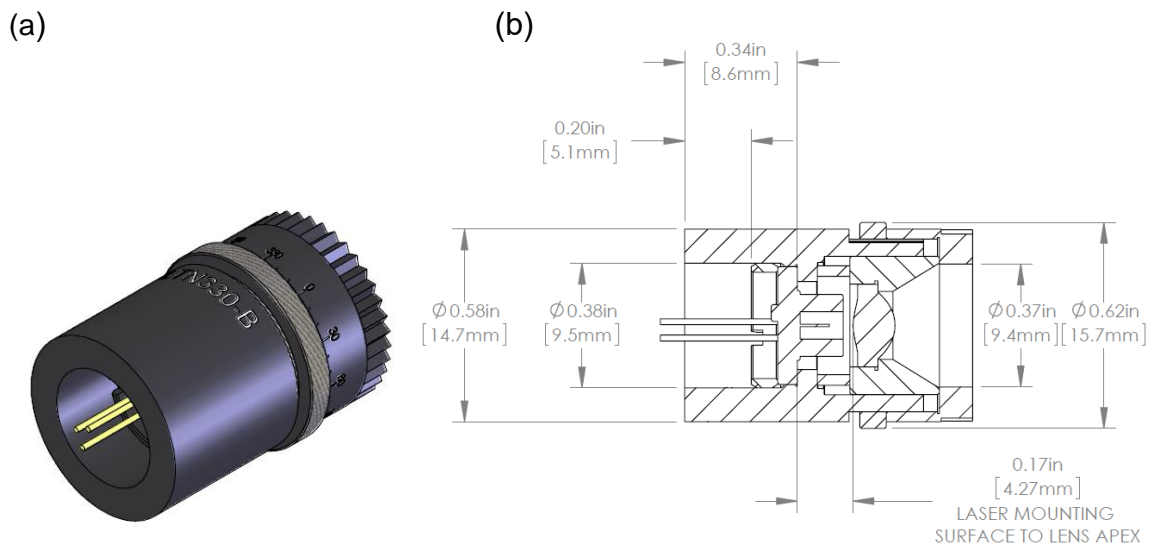


Figura 2.8. Montura de colimación **Thorlabs LTN330-B**. (a) Vista 3D, (b) Esquema y dimensiones de la montura.

Para la colimación se optó por un sistema más compacto, con el fin de simplificar y facilitar este proceso. Se empleó la montura **Thorlabs LTN330-B**, la cual entrega

un ajuste telescópico del lente, que permite un ajuste fino con un recorrido de 2.5[mm].

El colimador **Thorlabs** (Fig. 2.8) es de un tamaño muy reducido, lo que favorece en el diseño de la cavidad con la geometría estudiada. Y su ajuste telescópico entrega mayor manejo de la colimación, proceso fundamental para una correcta retroalimentación.

Como podemos observar en la Fig. 2.9 el colimador nos permite un rango amplio de ajuste, que se ajusta a la perfección con la lente esférica de distancia focal de 3.1[mm] (**Lightpath 354330-B**). Para lograr la colimación deseada se enfocó el láser a una distancia de 1.5[m].

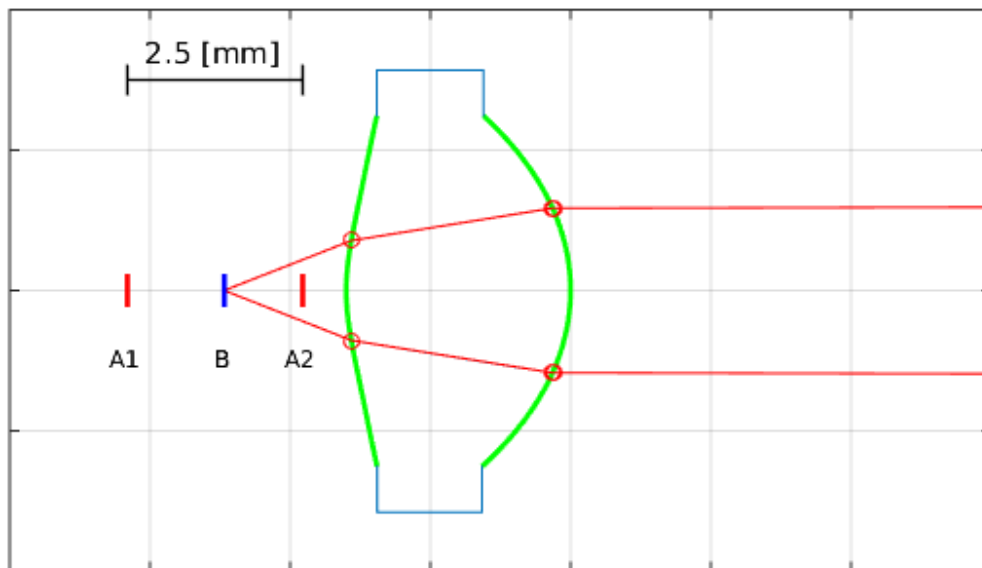


Figura 2.9. Diagrama de distancias relativas entre emisor (puntos A1, A2 y B) y lente. B representa la distancia óptima para la colimación, la cual se ubica entre los puntos A1 y A2 que representan los límites de ajuste de la montura **Thorlabs LTN330-B**.

Para fijar el colimador en el sistema se fabricó una montura en aluminio con forma de “T”, como se observa en la Fig. 2.10.

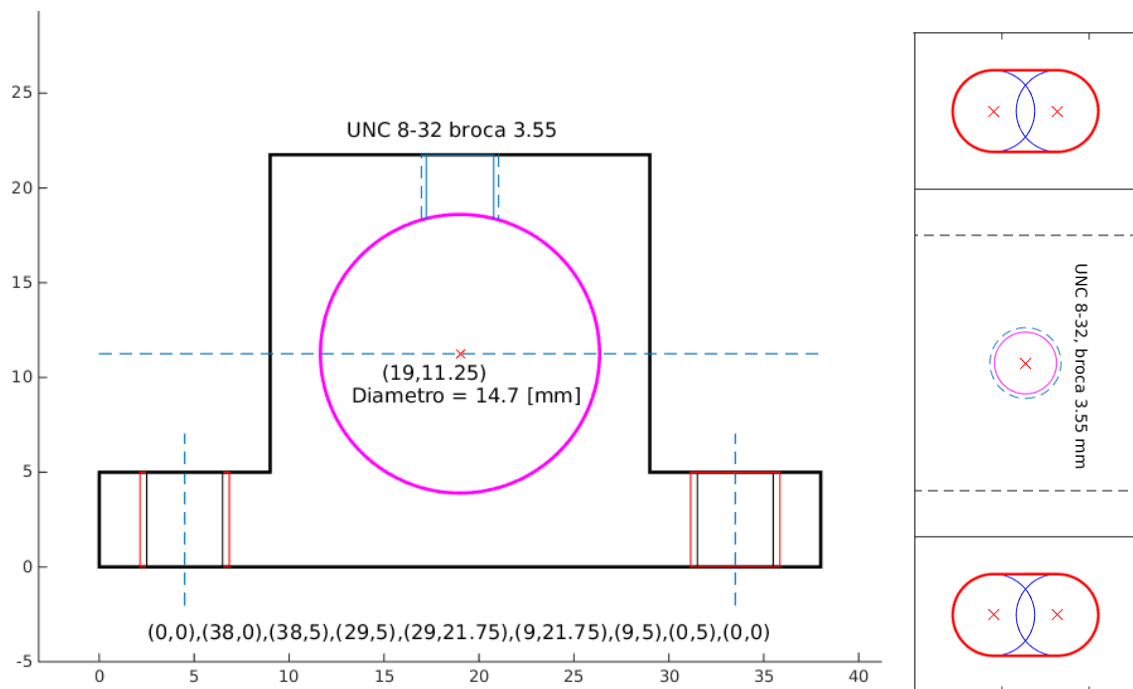


Figura 2.10. Montura en forma de “T” para colimador **Thorlabs LTN330-B**.

2.1.2.2. Red de Difracción y Retroalimentación Óptica.

Para la retroalimentación de este sistema se utilizó la red de difracción **Richardson Gratings 53*-430H** de **2400 líneas/mm**. Considerando la Ec. 2.1, se determinó que la red se debe disponer en un ángulo de 53.51° , para lo cual se diseñó y fabricó una montura con flexure (Fig.2.11) para facilitar esta configuración y permitir la sintonización del láser mediante el piezoeléctrico **AE0203D08F** (Manufacturado por **NEC Corporation**).

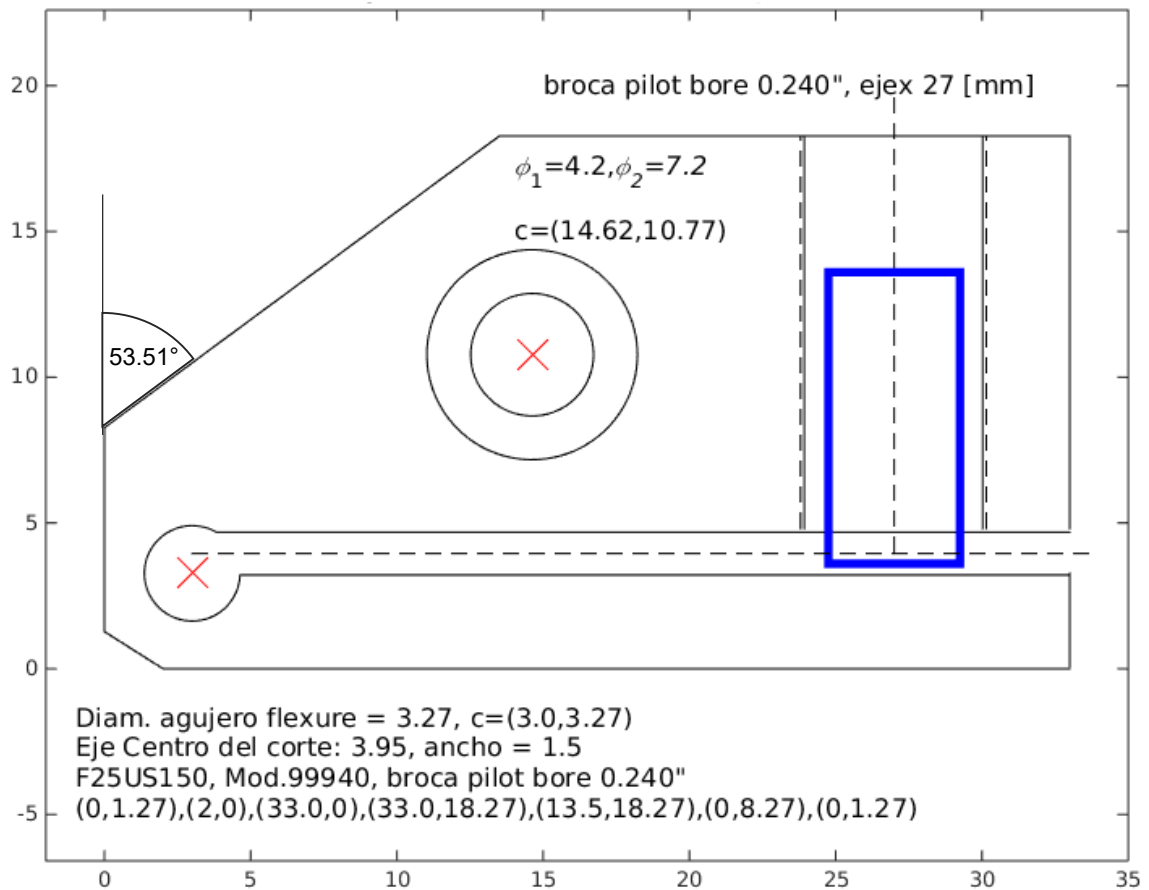


Figura 2.11. Montura con flexure para la red de difracción con piezoeléctrico **AE0203D08F** incorporado.

Como se observa en la Fig. 2.12, la red posee una eficiencia distinta para cada plano de polarización del láser, donde la eficiencia en el plano P está por debajo del 15% y sobre del 70% en el plano S, por lo cual es muy importante el plano de polarización con el cual se incide el láser sobre la red de difracción, más aún cuando el diodo láser está altamente polarizado. El láser fue girado manualmente hasta lograr la polarización deseada y se fijó firmemente para que este no se moviera de su posición.

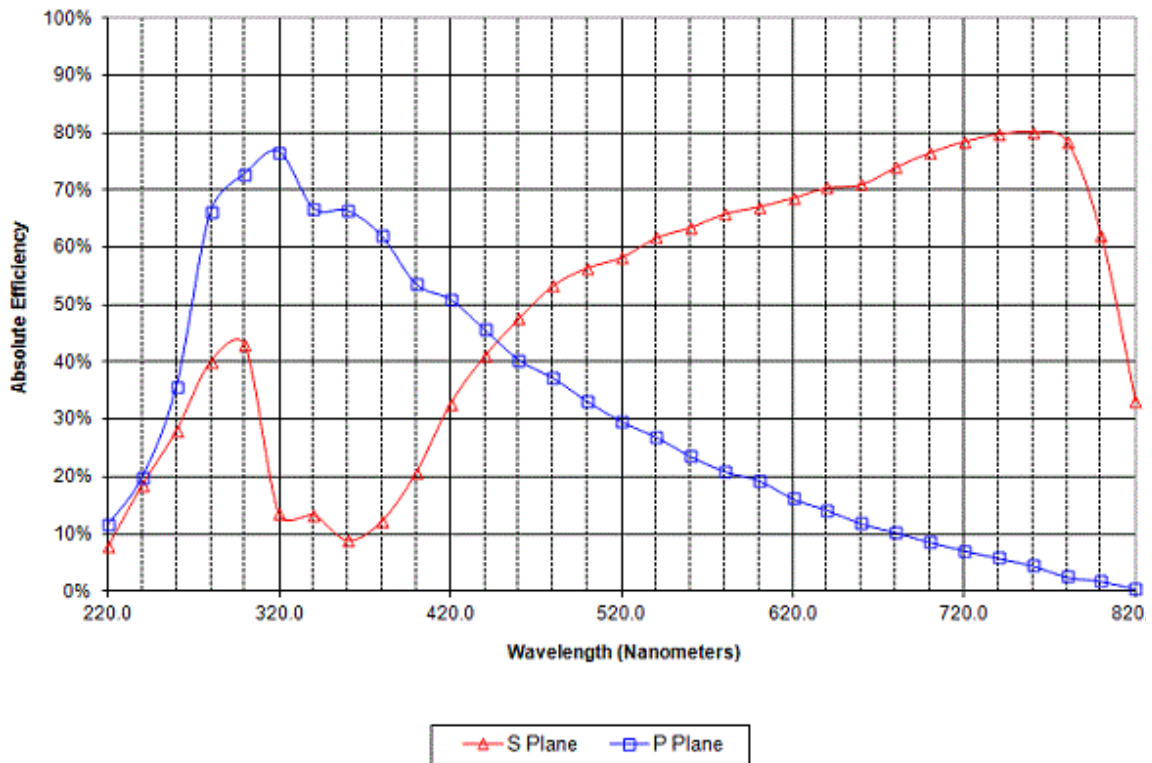
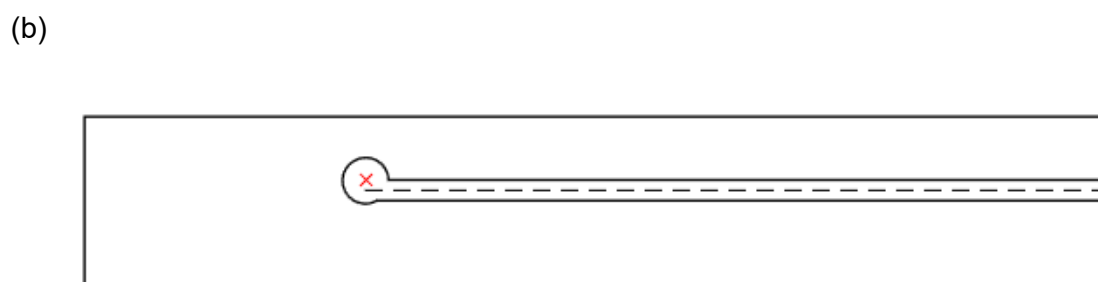
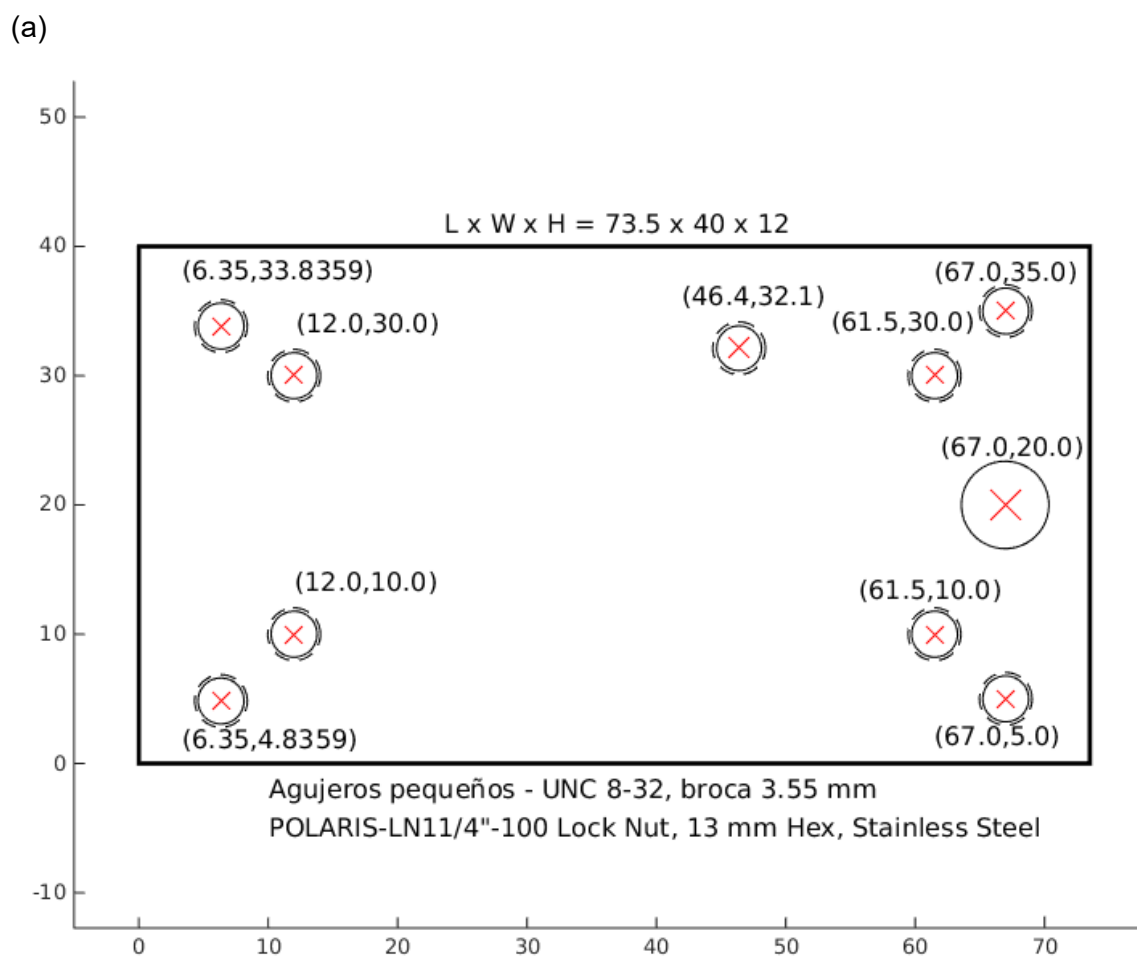


Figura 2.12. Eficiencia de la red de difracción de **Richardson Gratings** en función de la longitud de onda, para ambos planos de polarización.

2.1.2.3. Diseño de la Cavity.

Análogamente al otro láser desarrollado, la cavity estará conformada por dos bloques, donde uno actuará como sumidero de calor, mientras que el otro será el encargado de sostener la óptica. A diferencia del láser anterior la montura de la red de difracción posee ajustes solo para la componente del plano horizontal, entonces el bloque superior contará con un flexure que permitirá el ajuste vertical, para lograr la alineación óptima del sistema (Fig. 2.13).



$c = (20.0, 7.441)$, Diametro agujero = 3.27 [mm]

Ancho de Corte = 1.5 [mm], Eje Central = 6.763 [mm]

Figura 2.13. Bloque superior del sistema láser. (a) Vista superior del bloque y (b) Vista lateral del flexure de ajuste vertical.

Este bloque además cuenta con los hilos necesarios para fijar las dos monturas ya mencionadas (Fig. 2.10 y 2.11), junto con los cuatro hilos para fijar y unir los dos bloques del sistema. Además, se le incluyeron dos hilos a un extremo del bloque para levantar el flexure, y otro hilo de ajuste fino para bajarlo junto con la tuerca **Polaris-LN 11/4"**.

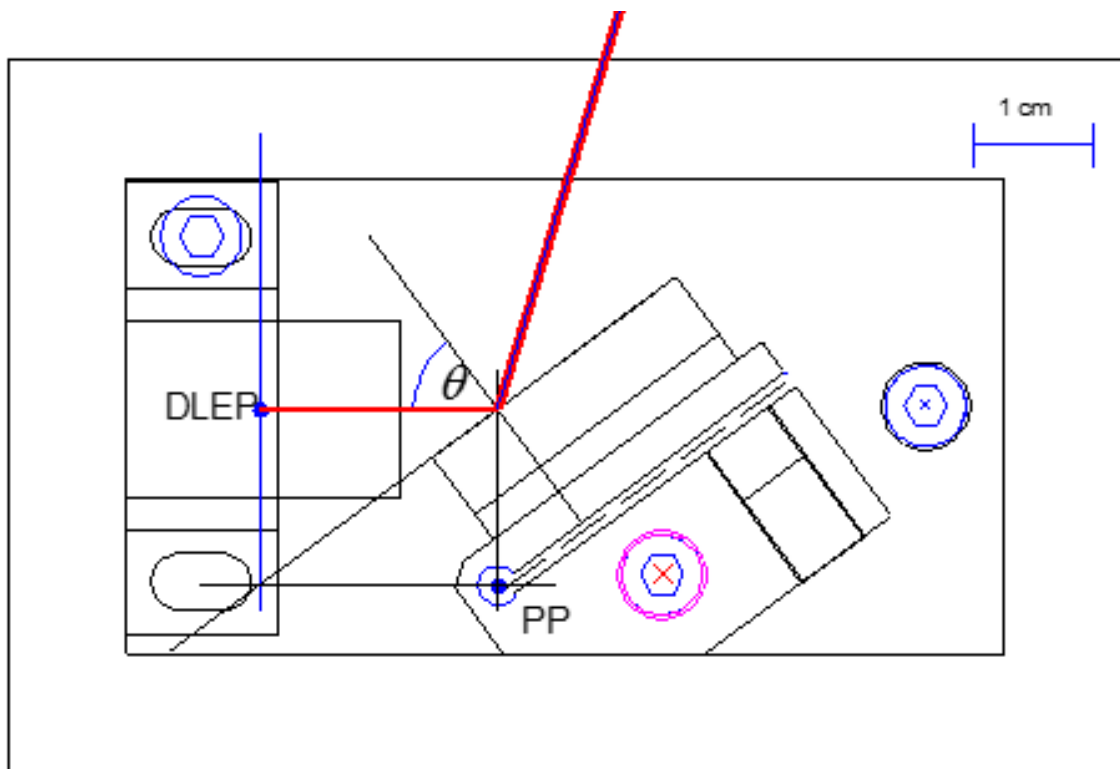


Figura 2.14. Esquema completo de la vista superior del sistema láser completo.

Para el bloque inferior, que actúa como sumidero, se utilizó un bloque de dimensiones muy superiores al diseño de láser anterior, con el fin de tener mayor espacio para incluir elementos ópticos de ser necesario. Al igual que en el otro sistema láser se utilizaron tarugos de PVC para unir ambos bloques (Fig. 2.6 (b))

2.1.2.4. Controladores de Corriente y Temperatura.

Para controlar la corriente y la temperatura se utilizaron los controladores **Thorlabs LDC205C** y **TED200C**. El primero de estos se conectó directamente al diodo mediante el cable **Thorlabs SR9B-DB9** (Fig. 2.2), y las características de este controlador son las siguientes:

Rango de Control (Continuo):	0 a + 500 [mA]
Exactitud:	100 [uA]
Exactitud de Limite de Corriente:	+ 1.5 [mA]
Tipo de Conector para Diodo Láser:	DB9 Hembra
Coeficiente de Modulación:	50 mA/V
Tipo de Conector para Modulación:	BNC
Tipo de Conector del Control de Corriente de Salida:	BNC
Máximo Consumo:	30 W
Dimensiones:	5.8" x 2.8" x 12.5"

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas del controlador de corriente **Thorlabs LDC205**.

Como se observa en la tabla 2.4, este controlador posee una entrada para modular la corriente suministrada al diodo láser, y una salida para monitorear dicha corriente. Para bajar y estabilizar la temperatura del sistema se utilizó el controlador **Thorlabs** ya mencionado junto a el termistor **TH10K** y el peltier **Melcor CP1.4-127-045L**.

Rango de Corriente:	-2A a +2A
Resolución de la Corriente:	1mA
Máxima Potencia de Salida:	12 W
Tipo de Conector:	DB9 Macho
Rango de Control (Termistor):	10 a 20k
Estabilidad de Temperatura (Termistor):	< 0.5 Ohm
Dimensiones:	5.8" x 2.8" x 12.5"

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas del controlador de corriente **Thorlabs TED200C**.

2.2. Determinación de Parámetros α y β .

Los parámetros α y β (Ec. 2.2) son los que dan cuenta la razón de cambio de la frecuencia en función de los modos internos (cambios en la corriente del diodo) y el largo de la cavidad (cambio en el voltaje del piezoeléctrico) respectivamente. Estas razones son importantes a la hora de realizar la sintonización sincrónica, ya que darán cuenta de cuanto debe ser el cambio de una con respecto a la otra para mantener la sincronía. Para determinar el parámetro α se montó un interferómetro Michelson (Fig. 2.15), con sus brazos de distinta longitud (L1 y L2).

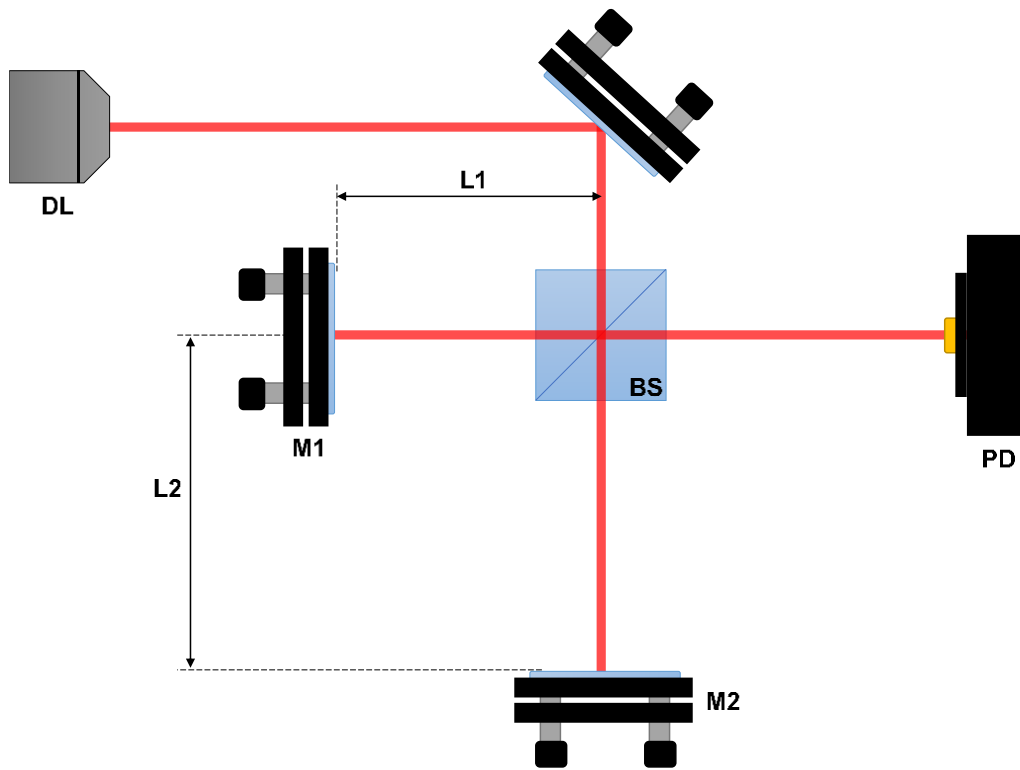


Figura 2.15. Esquema del interferómetro Michelson con sus brazos desbalanceados, utilizado para determinar el cambio en la frecuencia del láser. DL es el láser diodo, M1 y M2 son los espejos situados a distancias L1 y L2 respectivamente del divisor de haz (BS), y PD el fotodiodo.

Los parámetros α y β ya mencionados corresponden a los siguientes:

$$\alpha = \frac{\Delta\nu}{\Delta I_{DL}}, \beta = \frac{\Delta\nu}{\Delta V_{PZT}} \quad (2.2)$$

La diferencia de fase producto del desbalance de los brazos del interferómetro está dado por la expresión:

$$\phi_1 - \phi_2 = \frac{2\nu}{c} (L_1 - L_2) 2\pi \quad (2.3)$$

De esta forma el cambio de este estará dado por:

$$\Delta(\phi_1 - \phi_2) = 2 \frac{\Delta\nu}{c} (L_1 - L_2) 2\pi \quad (2.4)$$

Y la condición para tener un máximo en la intensidad, o bien interferencia constructiva, es:

$$\Delta(\phi_1 - \phi_2) = 2\pi \quad (2.5)$$

De este modo con la Ec. 2.4 y Ec. 2.5 tenemos:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2(L_1 - L_2)} \quad (2.6)$$

De esta manera sabremos cuanto es el cambio de en la frecuencia del láser en función del cambio de corriente. La Fig. 2.16 muestra un ejemplo de medición realizado sobre un diodo láser de 780 [nm], este mismo método fue realizado sobre el láser **Sacher SAL-0670-20** en funcionamiento libre sin retroalimentación, obteniendo un parámetro α de 1,01[GHz/mA].

Para determinar el valor de β para el láser Sacher, se instaló la red de difracción y se retroalimentó el sistema, para realizar un escaneo de frecuencias solo con el uso del piezoeléctrico. Se apuntó el láser al interferómetro Fabry Perot **Burleigh** de "Free Spectral Range" (FSR) de 2[GHz]. De este modo al estar variando la frecuencia del láser, en el interferómetro se observarán peaks distanciados por 2[GHz], que corresponden al FSR, con esta información fue posible determinar que el valor de β es de 0,71[GHz/V] (Fig.2.17)

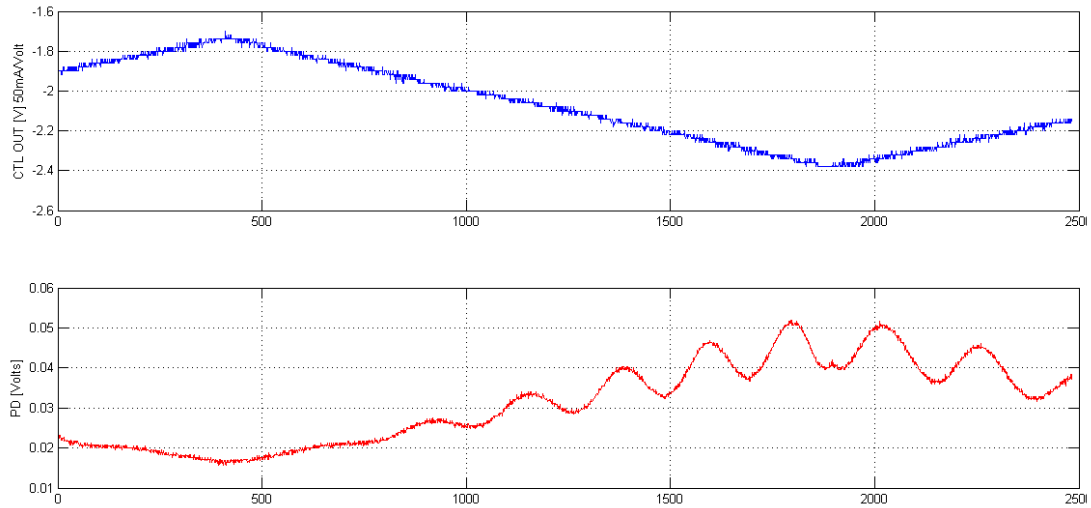


Figura 2.16. Señal del interferómetro Michelson (curva roja) realizada sobre diodo láser de 780[nm] para probar el método de medición, la señal de la corriente (curva azul) fue obtenida de la salida de control de corriente, del controlador LDC500 con un coeficiente de 50 [mA/V].

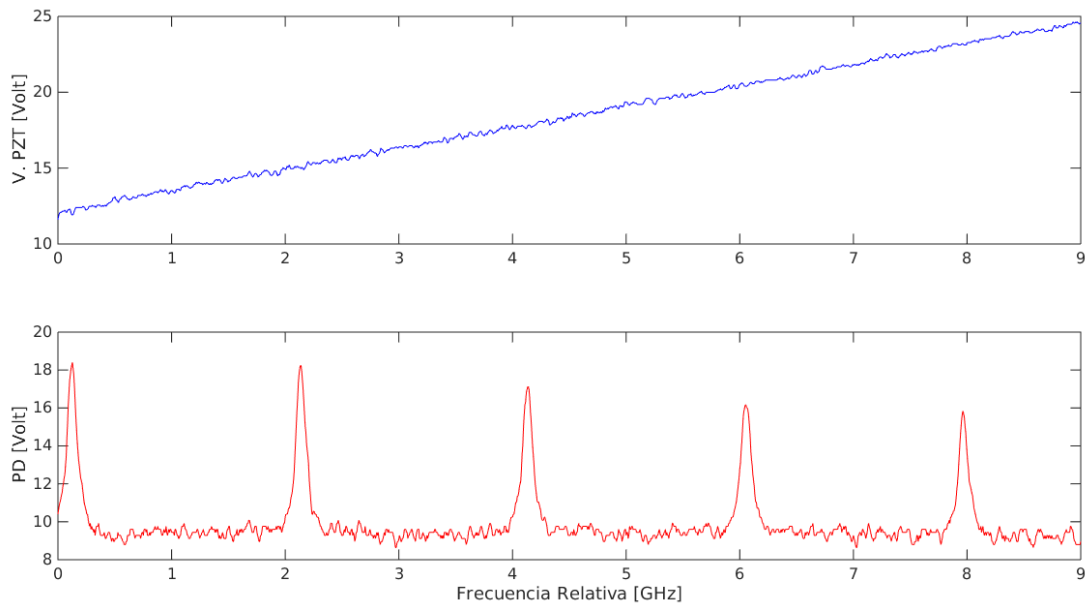


Figura 2.17. Señal del interferómetro Fabry Perot (curva roja) para el láser **Sacher SAL-0670-20** retroalimentado y con escaneo del piezoeléctrico, y la señal de la modulación del piezoeléctrico (curva azul).

2.2.1. Magic Box.

Para lograr la sintonización sincrónica es necesario modular en contra fase la corriente del diodo láser y el voltaje del piezoeléctrico, se diseñó un circuito amplificador inversor para lograr una señal en contra fase con una ganancia variable, que permitiera ajustar la modulación según los parámetros α y β , a este circuito se le denominó Magic Box. Considerando este circuito, se debe poder lograr modular el laser con 1,4[mA] por cada volt aplicado a la modulación del piezoeléctrico, para lograr la sintonización sincrónica. Cabe destacar que el coeficiente de modulación de corriente es de 50[mA/V].

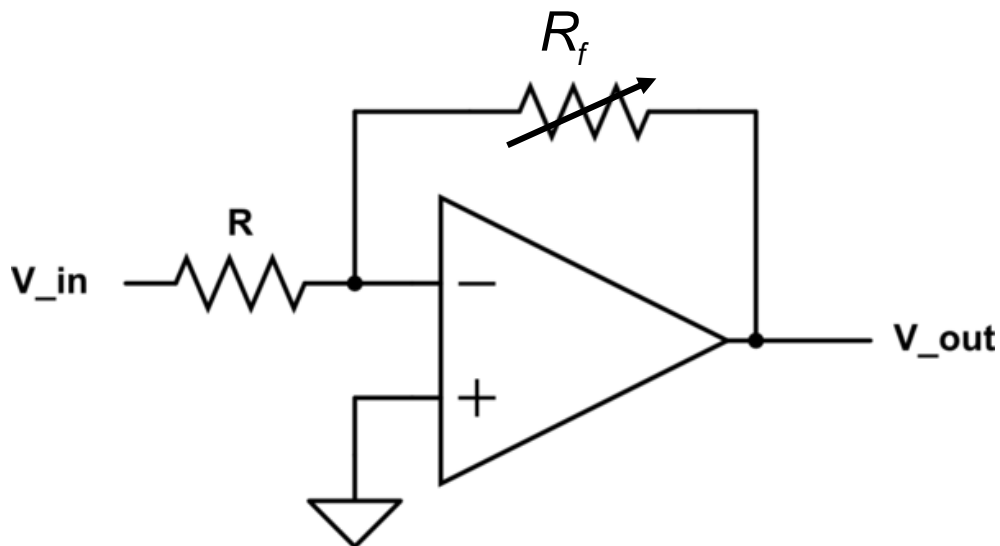


Figura 2.18. Esquema básico de amplificador inversor utilizado, con ganancia $-R_f/R$.

Para el caso particular del experimento se utilizó una resistencia de 22[kOhm] y un potenciómetro de 10[kOhm].

2.3. Celda de Gas de Litio para Absorción.

Para probar el funcionamiento del láser y su correcta sintonización, la celda de vapor de litio es una pieza fundamental. Para realizar este experimento se utilizó el Heat Pipe (Fig. 2.19) junto a su fuente de corriente **Comstock**, para generar el vapor de litio controlado, al que se le alineó el haz láser a través de sus ventanas hacia un fotodiodo. Antes de incidir el haz a través del Heat Pipe, este fue dividido y guiado con un divisor de haz 50/50 (Fig. 2.18) hacia el interferómetro Fabry Perot **Burleigh** de un FSR de 2 [GHz].

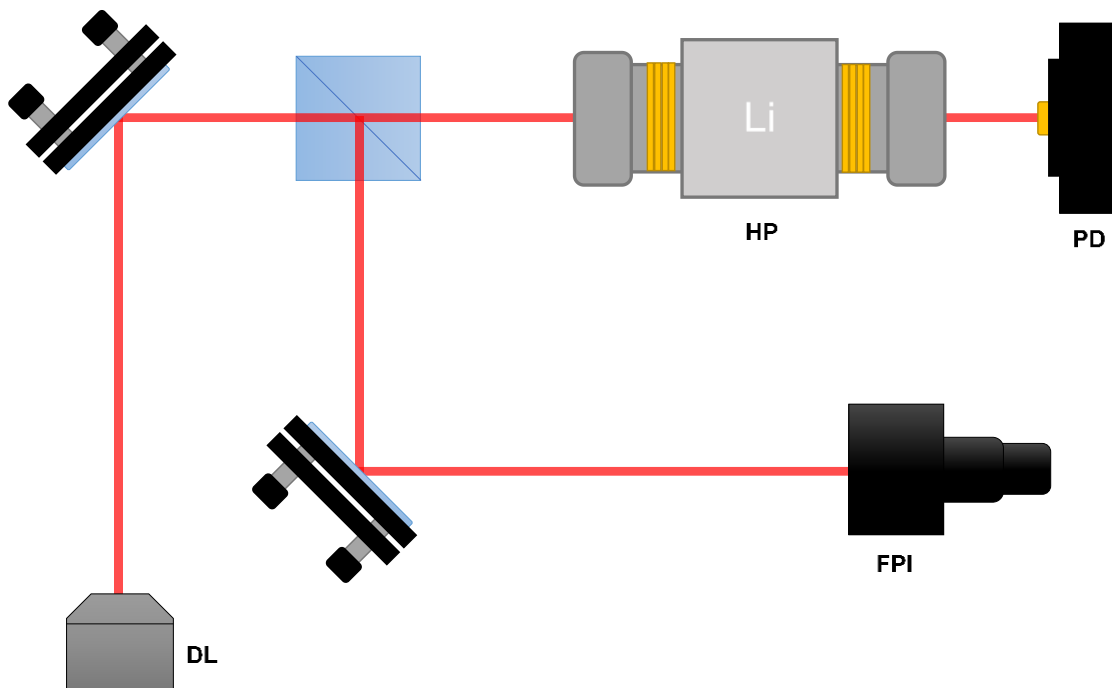


Figura 2.18. Montaje experimental para realizar la absorción de litio. DL corresponde al diodo láser, HP al Heat Pipe, PD al fotodiodo y FPI al interferómetro Fabry Perot.

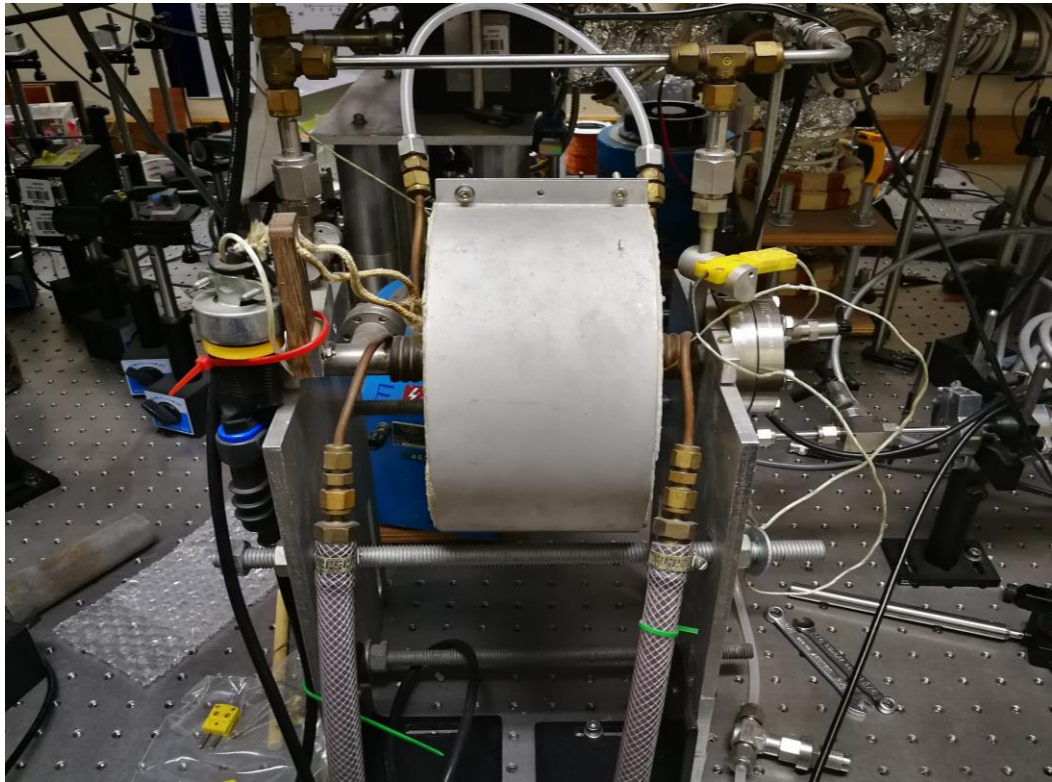


Figura 2.19. Imagen real del Heat Pipe. Se observa el horno cerámico que recubre el cuerpo principal en el cual se ubica la cámara de vacío y eje principal del sistema por el cual pasara el láser. También se observa el sistema de refrigeración en los extremos del horno cerámico el cual se encarga de mantener el gas en un volumen controlado y lejos de las ventanas.

Capítulo 3: Resultados.

3.1. Fabricación de los Láseres.

Ambos láseres fueron confeccionados en base a los diseños realizados. Ambas cavidades fueron confeccionadas en aluminio, por sus características térmicas y su fácil manipulación.

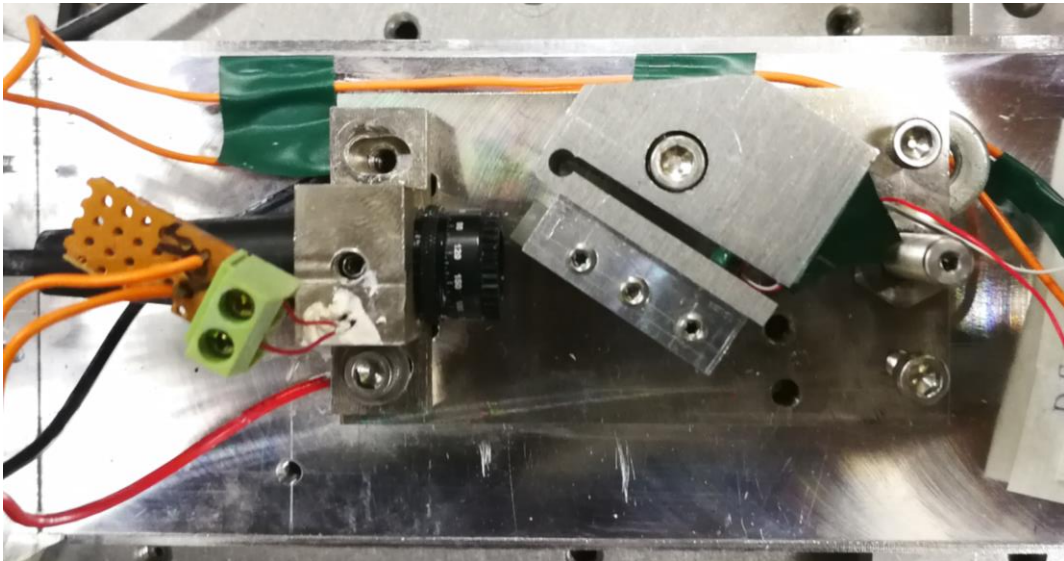


Figura 3.1. Láser diseñado y confeccionado considerando el estudio del pivote óptico, con el diodo láser **Toptica**.

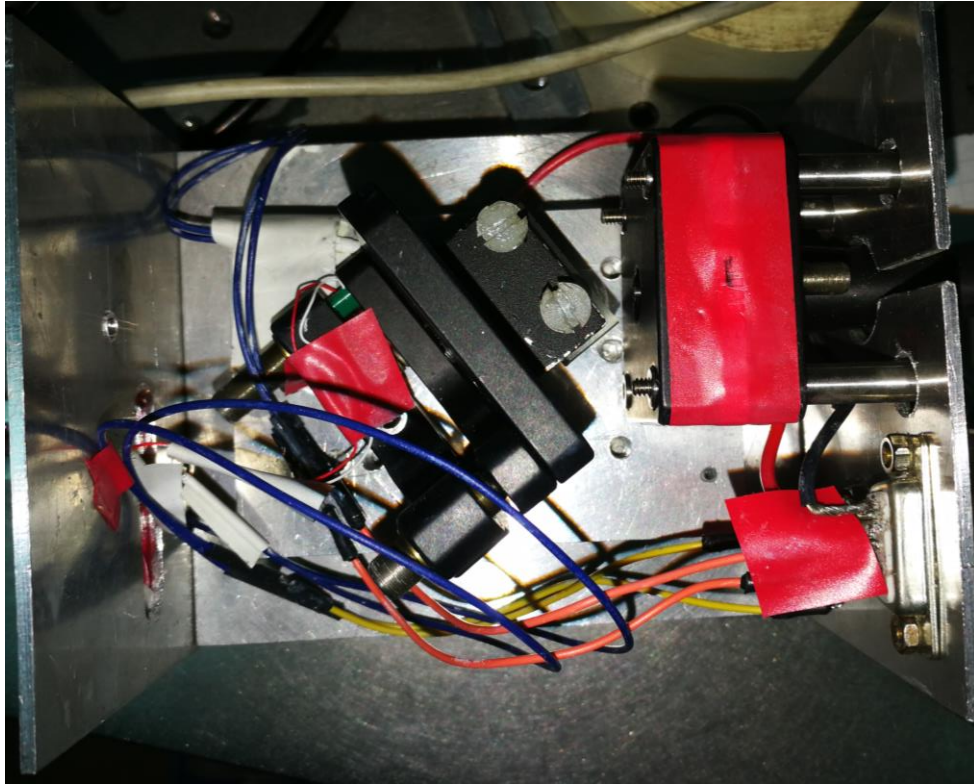


Figura 3.2. Láser diseñado y confeccionado sin considerar la posición del pivote, con el diodo láser **Sacher**.

3.2. Resultados de Emisión del Láser Sacher.

La Fig. 3.3 muestra el comportamiento de la potencia del diodo láser **Sacher SAL-0670-20**, en función de la corriente aplicada. La curva negra corresponde a la potencia del diodo láser sin retroalimentación y la curva roja a la potencia con retroalimentación.

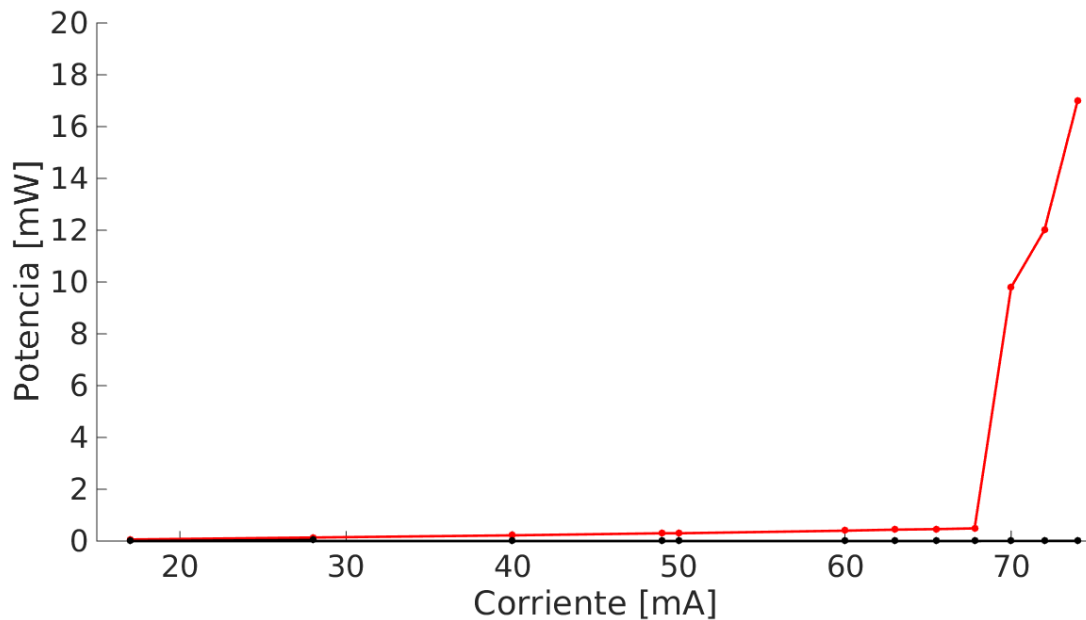


Figura 3.3. Curva de potencia en función de la corriente aplicada al diodo láser **Sacher SAL-0670-20** con (curva roja) y sin (curva negra) retroalimentación óptica.

3.3. Resultados de Estabilización del Láser Sacher.

La Fig. 3.4 muestra el espectro centrado en torno a los 670,01[nm] logrado con el láser Sacher dispuesto en una configuración de Littrow, medido con el espectrómetro **Thorlab modelo SP2-USB**. Esta se realizó con la temperatura estabilizada en 13,5°C y con una corriente de 91,2[mA].

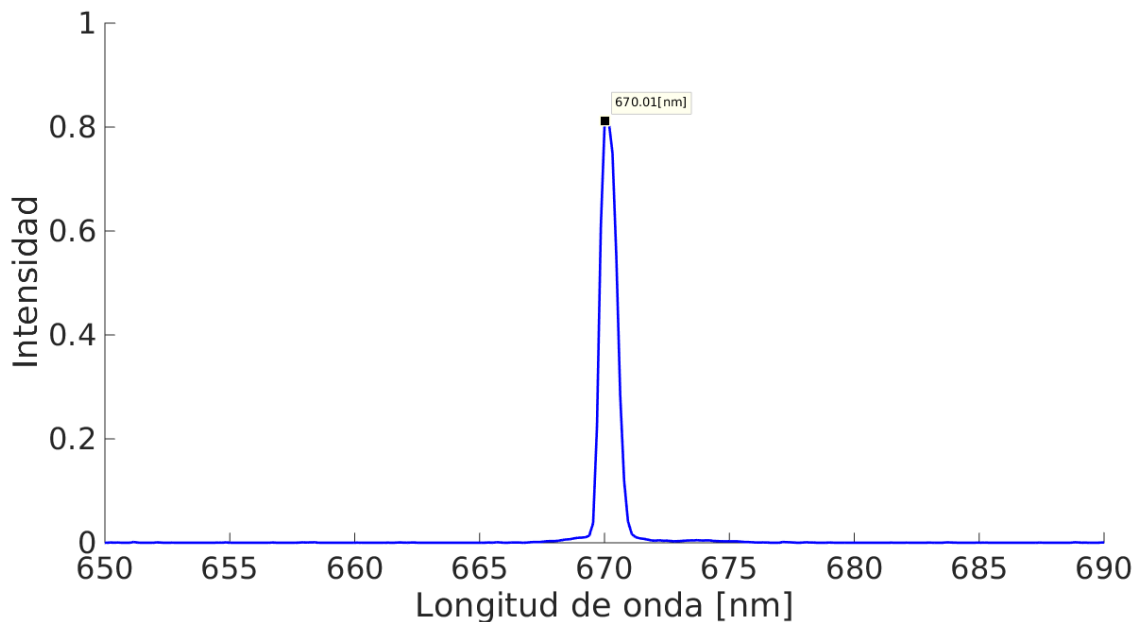


Figura 3.4. Espectro del láser centrado en 670,01[nm] logrados con la geometría estudiada para el diodo láser *Toptica Modelo*, con una temperatura de 13,5°C estable y una corriente de 91,2[mA].

3.4. Resultados de Sintonización y Absorción en Celda de Vapor de Litio Neutro de Láser Sacher.

La Fig. 3.5 muestra los resultados de funcionamiento del láser con una sintonización sincrónica sobre la celda de vapor de litio. Donde la corriente del láser fue modulada con una señal triangular, al igual que el voltaje del piezoeléctrico de la red de difracción, pero en contrafase. Estos valores fueron variados entre los siguientes valores:

Magnitud	Valor Mínimo	Valor Máximo
Voltaje PTZ [V]	20	80
Corriente LD [mA]	55	90

Tabla 3.1. Valores máximos y mínimos, del voltaje de piezoeléctrico y corriente aplicada al diodo láser.

La curva verde corresponde a la señal del interferómetro, donde la distancia entre peaks es de 2 [GHz], número que corresponde al FSR del interferómetro. Finalmente, la curva azul muestra la intensidad del láser en la salida de la celda de vapor de litio, es decir, el espectro transmitido a través del litio.

Para lograr el vapor de litio se calentó el Heat Pipe, hasta una temperatura de 614°C y se generó vacío, para luego agregar 1e-1[Torr] de gas buffer (Helio). A su vez se sintonizó el láser de forma sincrónica (parámetros mencionados anteriormente), para obtener un barrido de ~40[GHz].

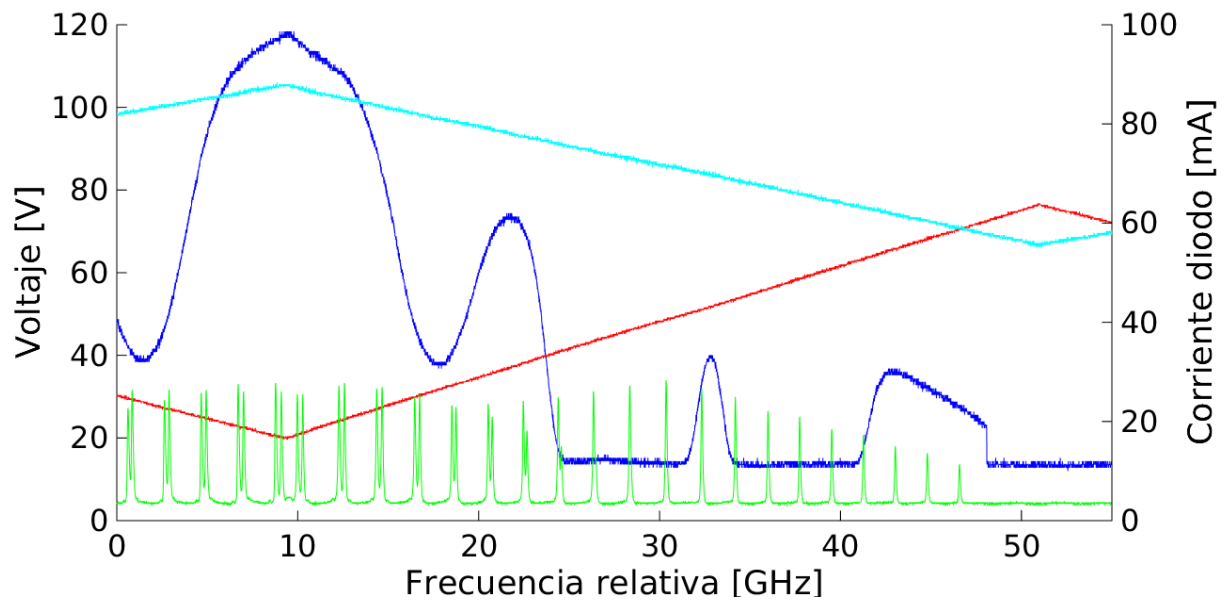


Figura 3.5. Resultados de absorción en litio con diodo láser Sacher. La línea azul corresponde a la señal del fotodiodo (PD) en el cual se observan las líneas de absorción del litio, la línea verde corresponde a la transmisión del interferómetro Fabry-Pérot (FPI), la línea roja corresponde al voltaje aplicado al piezoeléctrico (VPZT) que se encuentra en contra fase con la corriente aplicada al diodo láser, que corresponde a la línea cian. El láser fue configurado con valores operacionales iniciales de $I_{LD} = 91,2 [mA]$, $T_{LD} = 13,5 ^\circ C$ y $V_{PZT} = 20 [V]$.

3.5. Resultados de Emisión del Láser Toptica.

La Fig. 3.6 muestra el comportamiento de la potencia del diodo láser **Toptica LD-0675-0035-AR-1**, en función de la corriente aplicada. La curva negra corresponde a la potencia del diodo láser sin retroalimentación y la curva roja a la potencia con retroalimentación.

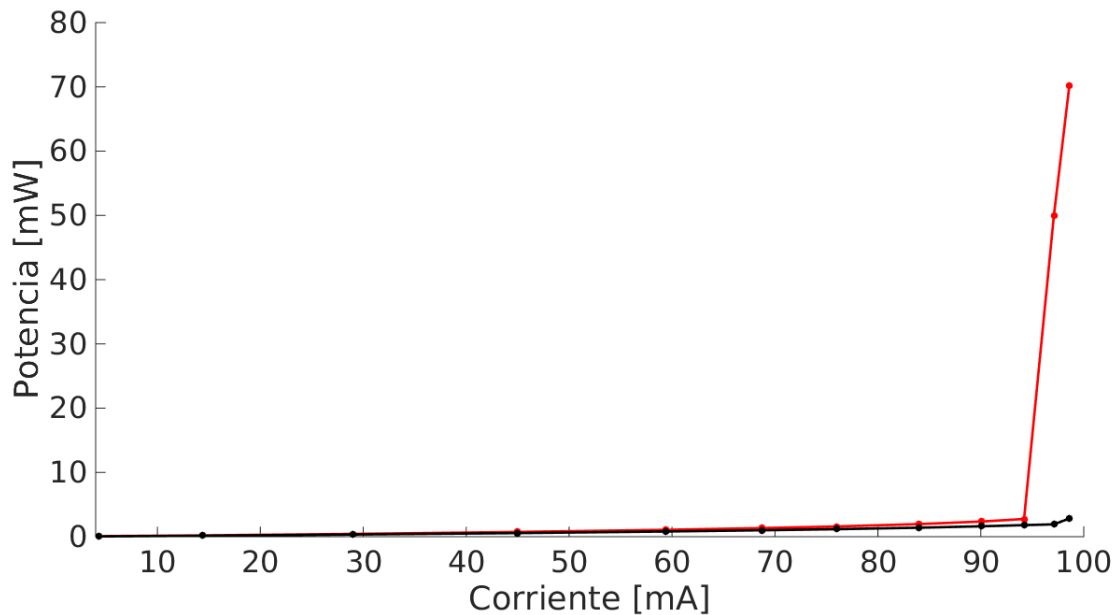


Figura 3.6. Curva de potencia en función de la corriente aplicada al diodo láser **Toptica LD-0675-0035-AR-1** con (curva roja) y sin (curva negra) retroalimentación óptica.

3.6. Resultados de Estabilización del Láser Toptica

La Fig. 3.7 muestra el espectro centrado en torno a los 670,01[nm] logrado con la geometría propuesta para el láser Toptica, medido con el espectrómetro **Thorlabs modelo SP2-USB**. Esta se realizó con la temperatura estabilizada en 9,6°C y con una corriente de 108,5[mA].

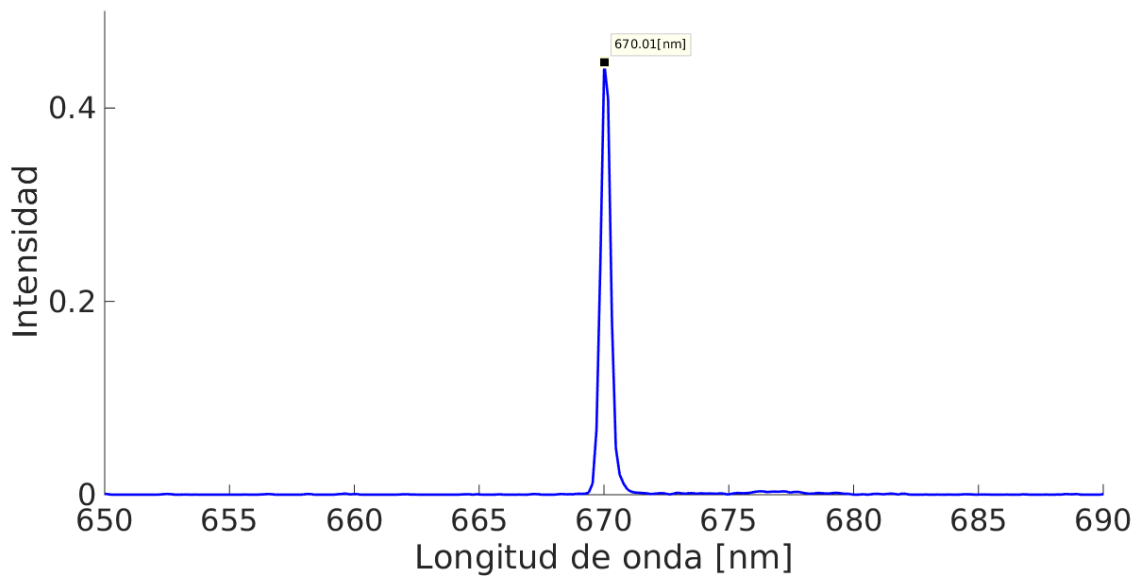


Figura 3.7. Espectro del láser centrado en 670,01[nm] logrados con la geometría estudiada para el diodo láser **Toptica Modelo SP2-USB**, con una temperatura de 9,6°C estables y una corriente de 108,5[mA].

3.7. Resultados de Barrido de Láser Toptica

La Fig. 3.8 muestra el barrido realizado con el láser Toptica, mediante la aplicación de una señal triangular, con valores que oscilan entre los 27,4[V] y los 81,1[V], para desplazar la red de difracción y variar la longitud de onda del láser.

Previo al barrido, el láser fue ajustado en los parámetros para los cuales se obtuvo una emisión estable en torno a los 670,01[nm]

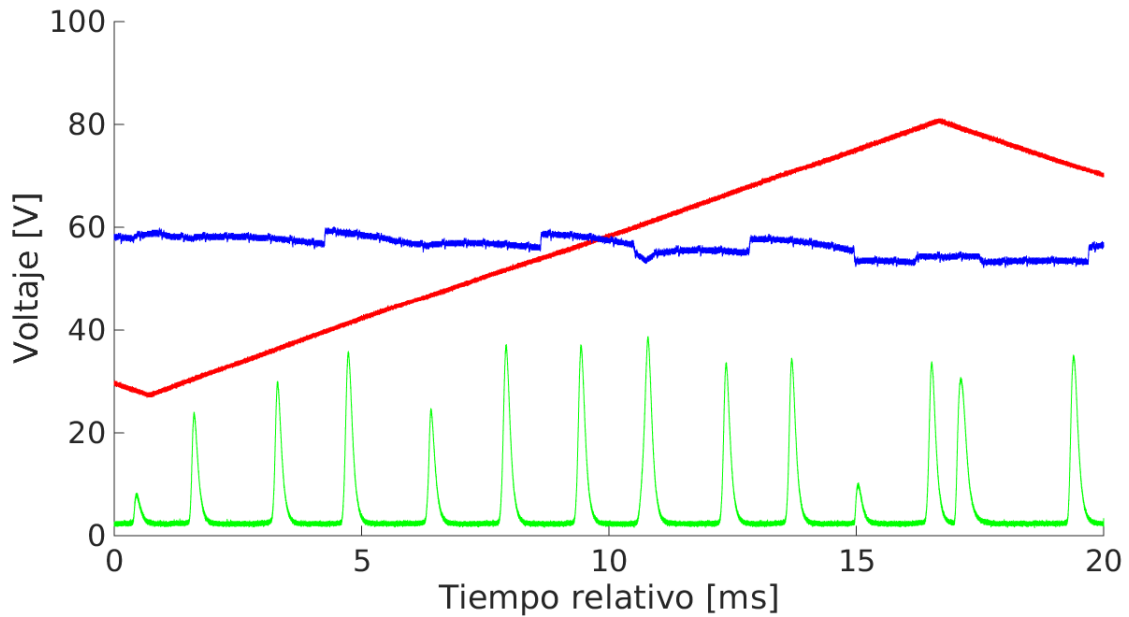


Figura 3.8. Resultados del barrido realizado en el láser Toptica, mediante la modulación del piezoeléctrico de la red de difracción. La línea azul corresponde a la señal del fotodiodo (PD) en el cual se observan saltos de modo, la línea verde corresponde a la transmisión del interferómetro Fabry-Pérot (FPI) y la línea roja corresponde al voltaje aplicado al piezoeléctrico (VPZT). El láser fue configurado con valores operacionales iniciales de $I_{LD} = 108.5 [mA]$, $T_{LD} = 9,6 ^\circ C$ y $V_{PZT} = 27,4 [V]$.

Capítulo 4: Análisis de Resultados.

4.1. Láser Sintonizable Sacher

En las Fig. 3.3. y Fig. 3.4 se aprecia cómo responde el láser fabricado sin estudio del pivote con el diodo láser marca Sacher, donde se logró una correcta emisión del diodo con retroalimentación y se logró estabilizar el láser en torno a los 670[nm] respectivamente.

Posteriormente se realizó el experimento de absorción en vapor de litio, para corroborar la correcta sintonización del láser en torno a la longitud de onda deseada, lo cual se observa en la Fig. 3.5. En este proceso se obtuvieron las líneas completas del espectro de absorción del litio, pero con una calidad inferior a mediciones de absorción realizadas anteriormente en el laboratorio, donde se utilizó el láser comercial **EOSI Láser 2010** (Ver Fig. 4.1). No obstante, a pesar de esta diferencia, se logró sintonizar correctamente el láser en torno a la longitud de onda deseada barriendo alrededor de 40 [GHz], con el método sincrónico.

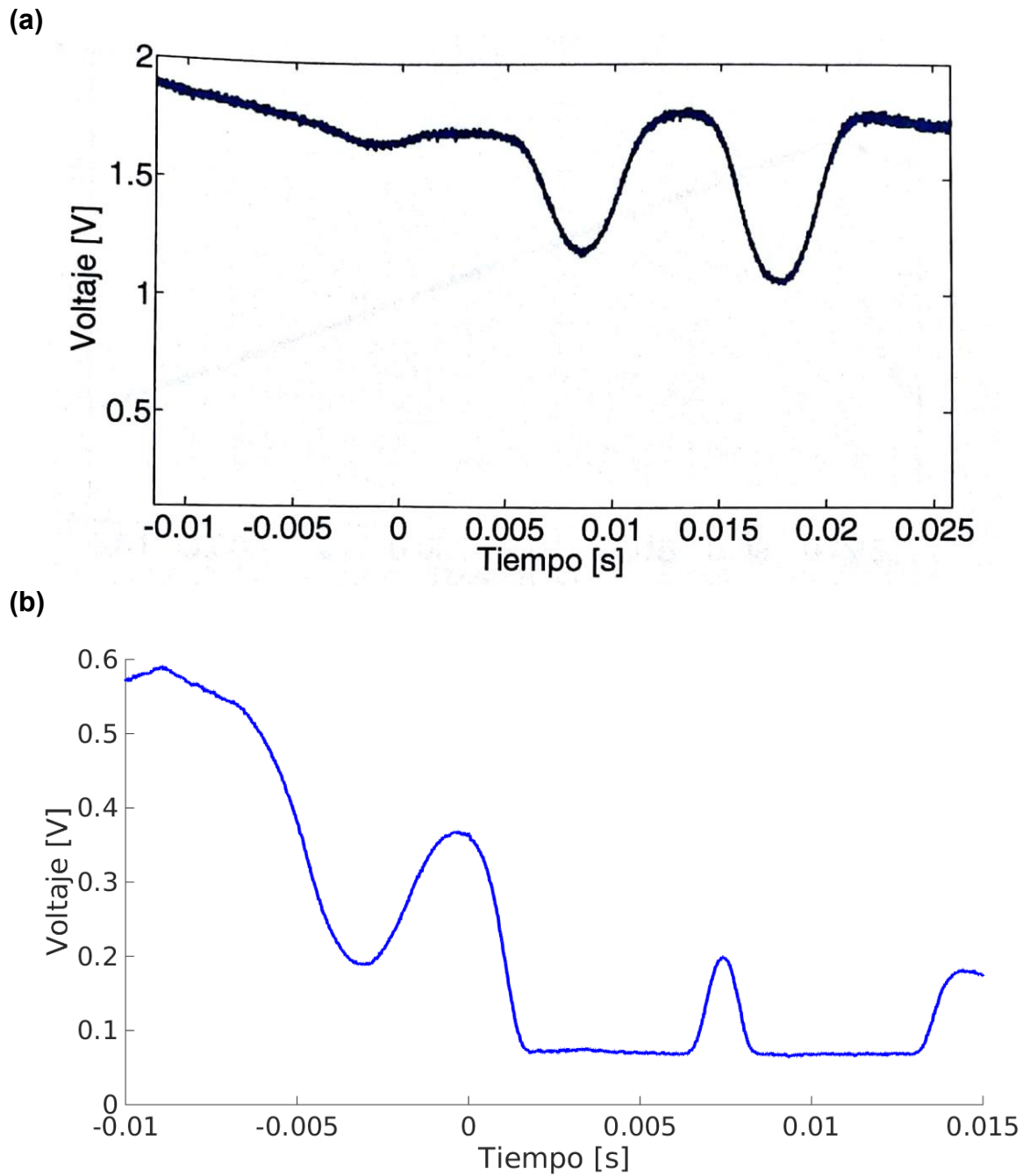


Figura 4.1. (a) Resultados de absorción obtenido anteriormente en el laboratorio, con el láser comercial EOSI. (b) Resultados de absorción obtenidos con el láser fabricado con el diodo láser marca Sacher.

4.2. Láser Sintonizable Toptica

En las Fig. 3.6 y Fig. 3.7 se aprecia cómo responde el láser fabricado con estudio del pivote y el diodo láser Toptica, donde se logró una correcta emisión del diodo con la retroalimentación y se logró estabilizar el láser en torno a los 670 [nm] respectivamente.

En la Fig. 3.8 se observa el barrido realizado, en el cual se aprecian saltos de modo producto de una fallida sintonización. En este diseño se aplicó el estudio del pivote con el fin de aumentar el rango de sintonización libre de saltos de modo sin aplicar el método sincrónico con una rampa de corriente.

Capítulo 5: Discusión.

La fabricación de láseres de diodo de cavidad externa suele ser un trabajo difícil, en especial en longitudes de onda como 670[nm]. La principal dificultad consiste en encontrar diodos láser centrados en dicha longitud. Es posible desarrollar un láser sintonizable en torno a los 670[nm] con un diodo láser centrado en 675[nm], forzando el láser, bajando su temperatura y llevando la longitud de onda al mínimo valor posible. Un ejemplo es el diodo **Toptica** usado en esta tesis.

Mientras se realizaba la tesis el fabricante nos cuenta que disponían de un láser centrado en 670[nm]. Ese láser fue vendido al poco tiempo y dejó de estar disponible, lo que ejemplifica una de las principales dificultades en este tipo de desarrollos.

Logramos retroalimentar y emitir con el láser **Toptica** en torno a 670[nm] y descubrimos que a pesar de ser óptimo la posición del pivote seguía habiendo saltos de modo, lo que indicaba que era necesario agregar el método de sintonía sincrónica. Esto se hizo, pero no se ha completado el estudio.

Conclusión.

Se logró diseñar y fabricar dos diodos láseres de cavidad externa, utilizando por primera vez en el laboratorio diodos con recubrimiento anti-reflejo. En el primero de los diseños se utilizaron monturas comerciales junto a un diodo láser **Sacher SAL-0670-20**, con el cual se logró la emisión láser con retroalimentación óptica y un barrido libre de saltos de modo de ~ 40 [GHz] en torno a los 670[nm]. Todo corroborado con mediciones del espectro de absorción vapor del litio logrado en el Heat Pipe.

El segundo láser diseñado y fabricado en su totalidad, incluyendo las monturas en base a la geometría estudiada. A nivel de fabricación fue un gran avance, se logró estudiar y desarrollar diversas monturas y partes móviles del tipo “flexure”, enriqueciendo el conocimiento y alcance del laboratorio. Se encontró geoméricamente el punto de pivote óptimo, pero experimentalmente se encontraron saltos de modo y fue necesario usar la sintonización sincrónica para eliminarlos.

Se logró la emisión láser con retroalimentación óptica y estabilizada en 670,01[nm], con un diodo láser centrado en 675[nm] (**Toptica LD-0675-0035-AR-1**).

Referencias Bibliograficas

Alarcón Ramirez, Hector – “Métodos de sintonización de frecuencia para un diodo láser”, Trabajo de Titulación, 2005.

Atutov S.N., Mariotti E., Meucci M., Bicchi P., Marinelli C., Moi L. – “A 670 nm external-cavity single mode diode laser continuously tunable over 18 GHz range”. Optics Communication, 107, pag. 83 – 87, 1994

Boshier M.G., Berkeland D., Hinds E.A., Sandoghdar V. – “External-cavity frequency-stabilization of visible and infrared semiconductor lasers for high resolution spectroscopy”. Optics Communication, 85, pag. 355 – 359, 1991

Cuadra Véliz, Jorge Antonio – “Estabilización de frecuencia de un láser de diodo”, Trabajo de Titulación, 2008

Dutta S., Elliott D.S., Chen Y.P – “Mode-hop-free tuning over 135 GHz of external cavity diode lasers without antireflection coating”. Applied Physics B, 106, pag. 629 – 633, 2012

Dutta S., Elliott D.S., Chen Y.P – “Mode-hop-free tuning over 140 GHz of external cavity diode lasers without antireflection coating”, n.d.

MacAdam K.B., Steinbach A., Wieman C. – “A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and saturated absorption spectrometer for Cs and Rb”, Am. J. Phys., 60, pag. 1098 – 1111, 1992

Moreno Perez, Cristian Patricio – “Desarrollo de un prototipo de láser sintonizable visible para mediciones de contaminantes atmosféricos y evaluación de la factibilidad de su uso en aplicaciones industriales”. Trabajo de Titulación, 2011

Sacher Lasertechnik Group – “Technical Note – No. 1”. Technical Documentation, <http://data.sacher-laser.com/techdocs/PoDL.pdf>

Sacher Lasertechnik Group – “Technical Note – No. 5”. Technical Documentation, <http://data.sacher-laser.com/techdocs/wavelength.pdf>

Schaaf Fritis, Max Alexander– “Espectroscopía láser de absorción saturada en átomos de rubidio”, Trabajo de Titulación, 2004.

Tapia Farias, Jorge Eduardo – “Construcción de una celda de calibración para mediciones de concentración de contaminantes atmosféricos y evaluación de su uso industrial”. Trabajo de Titulación, 2011

Wieman, Carl (Basado en sus escritos)– “Doppler-Free Saturated Absorption Spectroscopy: Laser Spectroscopy”. Advanced Optics Laboratory, pag. 14 – 15, n.d.