



Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología  
Unidad Valle de las Palmas

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología  
Unidad Valle de las Palmas**

***DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LÁSER DE ESTADO SÓLIDO INFRARROJO PARA  
SU APLICACIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE MATERIALES  
BIOLÓGICOS***

Tesis que para obtener el título de:

**BIOINGENIERO**

Presenta:

**Kayra Zakimy Meza Alanis**

Director de tesis:

**Dra. Norma Alicia Barboza Tello**

Tijuana, B. C.

Octubre, 2019

**Resumen** de la tesis de Kayra Zakimy Meza Alanis, presentada para la obtención del título de Bioingeniero. Tijuana, B.C., octubre de 2019.

## **DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LÁSER DE ESTADO SÓLIDO INFRARROJO PARA SU APLICACIÓN EN LA CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE MATERIALES BIOLÓGICOS**

Los láseres presentan una gran variedad de aplicaciones en medicina y en Biología debido a las propiedades físicas de la luz que emiten, es luz intensa, monocromática y direccional, por lo que es fácil de manipular con el uso de elementos ópticos adecuados. Aunque existe una innumerable cantidad de láseres comerciales, el contar con uno propio en el laboratorio de óptica de la FCITEC es una gran ventaja ya que permite hacerle modificaciones para adecuarlo a diversas aplicaciones.

Se presenta el diseño y fabricación de un láser de estado sólido bombeado por diodo, basado en cristal de Nd:YVO<sub>4</sub>. El láser emite a una longitud de onda de 1064nm con un ancho espectral de 0.5nm. En modo continuo el láser emite más de 2.5W de potencia y al agregarle un modulador pasivo, un cristal de Cr:YAG, emite pulsos de 65ns de duración a una frecuencia de repetición de 18kHz, desafortunadamente fue imposible medir la energía por pulso debido a que no se cuenta con el detector necesario para hacerlo. Como trabajo a futuro se propone medir la potencia promedio para estimar la energía por pulso.

**Palabras clave:** Láser de estado sólido, Q Switching pasivo, Cristal Nd:YVO<sub>4</sub>.

**Summary** of the thesis of Kayra Zakimy Meza Alanis, presented to obtain the title of Bioengineer. Tijuana, B.C., October 2019.

Lasers have a wide variety of applications in medicine and Biology due to the physical properties of the light they emit, it is intense, monochromatic and directional light, so it is easy to manipulate with the use of suitable optical elements. Although there is an innumerable number of commercial lasers, having your own in the FCITEC optics laboratory is a great advantage since it allows you to make modifications to adapt it to several applications.

The design and manufacture of a diode-pumped solid-state laser based on Nd:YVO<sub>4</sub> crystal is presented. The laser emits at a wavelength of 1064nm with 0.5nm spectral width. In continuous mode, the laser emits optical power greater than 2.5W and by adding a passive modulator, a Cr: YAG crystal emits pulses of 65ns duration at a repetition frequency of 18kHz, unfortunately, it was impossible to measure the energy per pulse due to that there is no detector necessary to do so. As a work in the future it is proposed to measure the average power to estimate the energy per pulse.

**Keywords:** Solid-state laser, Passive Q-switching, Nd:YVO<sub>4</sub> crystal.

## ***A mi Madre.***

La realización de este proyecto no fue nada fácil, el camino fue largo y pues como cada camino a veces está destruido y toma su tiempo en repararse, siempre tuve algunos obstáculos de diferentes niveles, algunas veces me quería dar por vencida o dejarlo así, solo concluida la carrera sin mi proyecto, pero siempre llegabas a decirme “y como para cuándo piensas acabar esa tesis, tantos esfuerzos y sacrificios que hice yo por ti y tu no puedes hacer eso por mí, si ocupas algo dime y yo te apoyo en lo que pueda” parecía que te metías a mi mente justo cuando pensaba “ya no lo lograré”, y ahí iba de nuevo a trabajar otro poco en mi proyecto, fue un tiempo largo el que tarde pero tu nunca te rendiste siempre me decías la misma frase y yo me motivaba para ir a la escuela a trabajar en él, que suerte que no tienes el número de la Dra. Norma porque estoy segura que le marcabas, pero aquí estamos mami esta tesis es tan tuya como mía, muchas gracias por todo tu apoyo incondicional que toda la vida me das, TE AMO.

# Agradecimientos

Mi etapa Universitaria estuvo llena de momentos inolvidables, algunos fueron muy buenos otros malos pero cada uno dejando una experiencia y lección de vida únicos, donde me fue enseñando que la vida siempre es de cambios constantes y que el camino es largo pero no imposible, que muchas personas son muy buenas y siempre estarán sin importar las circunstancias, y que otras solo en ciertos momentos y se van; pero siempre hay que tomar lo mejor de cada persona con la que nos encontramos porque esas pequeñas cosas ayudarán más de lo que se imagina y servirá toda la vida.

Primero quiero agradecer *A mi mamá* quien es mi inspiración y el mejor ejemplo de vida que pueda tener, ella siempre me enseñó que todo era posible que no importara qué fuera, siempre se podía y que siempre debía dar lo mejor de mí en cada cosa que hiciera, ella siempre me apoyó y me decía que si yo quería ser una zapatera lo fuera pero que fuera la mejor haciendo lo que me gusta y me apasiona, que así fuera eso si eso quería ella me apoyaría, porque así es ella, me enseñó que cada trabajo es digno y se debe de respetar y uno se debe de esforzarse por ser mejor. Hubo un momento de mi etapa universitaria en el cual ya no quería continuar con esta carrera y mi mamá dejó de apoyarme y me dijo hija lo que uno empieza lo acaba, y si es cierto solo fue un momento de berrinche y querer vida fácil, y pensé y reflexioné que yo no quería eso, que yo quería ser ingeniera y que debía ponerle esfuerzo y dedicación para lograrlo.

*A mi Papá* por estar ahí en todos los momentos buenos y malos y darme su apoyo cuando le fue posible.

A mis hermanos *Cecilia, Noé, Brayán y Sergio*, por estar siempre conmigo apoyándome cada uno de diferente manera a lo largo de mi carrera y también por toda su carrilla y haciendo chistes de mi con la carrera.

A la *Dra. Norma Barboza*, usted es parte de esta tesis, pues no es solo mía también es de usted que siempre me ayudó, me brindaba todo el material posible, su ayuda incondicional y me echaba ánimos. Al principio no fue fácil cuando le presenté

mi primer proyecto intentando hacer un láser en la asignatura de óptica y acústica, y usted nos dijo “solo hicieron prender un láser”, cuando dijo eso me dio mucha vergüenza y claro reprobé el semestre pero no me rendí, y pensé “si todo ese pequeño proyecto logró hacer que el láser nomas prendiera qué más necesito” y empezó mi inquietud por aprender más sobre los láseres y sus funciones, y todo esto gracias a usted Dra. Norma que a pesar de mis ausencias siguió constante en su apoyo que hasta la fecha me lo ha brindado incondicionalmente y no tengo las palabras para agradecerle todo lo que me ha ayudado y apoyado a lo largo de este proyecto.

*Al Dr. Paúl Medina*, por su apoyo, por enseñarme a que las personas son así por alguna razón y siempre ver el lado bueno de ellas, por esas mañanas y tardes de “raites” y que gracias a eso conseguía llegar temprano a la escuela. Siempre estuvo ahí para ayudarme con este proyecto y muchas cosas más, no tengo como agradecerle que sea un gran maestro y amigo.

*Al Dr. Luis Ríos* por el apoyo en la asesoría técnica, por la ayuda para la fabricación de las monturas, y el préstamo de material cuando lo necesite. Muchas gracias Dr.

A mis cuñadas *Yuniva e Iliana*, por estar en esta etapa de mi vida y apoyarme de diferentes maneras en sus momentos, esa vez que Yunny me hizo Bullying diciéndome que no podía ni graduarme del tronco común inolvidable y esa presión tuya Iliana de siempre preguntarme que yo para cuándo terminaría mi carrera y aquí ando ya terminando esta etapa.

A los Profesores, Dra. Noemí Lizárraga, Dr. Allen Castillo y Mtro. Alejandro Díaz, gracias por aceptar ser miembros de mi comité de tesis y por su tiempo.

*A Johanna* por siempre brindarme su apoyo, por estar conmigo en cada momento sin importar su dificultad, por ayudarme cada vez que necesité ir a la escuela a continuar con el proyecto y en ocasiones hasta acompañarme, muchas gracias te quiero.

*A mis amigos* a todos a cada uno que estuvo ahí conmigo, en los momentos malos y buenos, a ellos que se convirtieron en mi familia a lo largo de mi carrera y me enseñaron muchas cosas y como cada uno de ustedes me complementaban algo bueno, que a veces no éramos muy buenos trabajando en equipo, pero nos esforzamos y lo lográbamos. Muchas gracias a todos y cada uno de ustedes por estar ahí.

# CONTENIDO

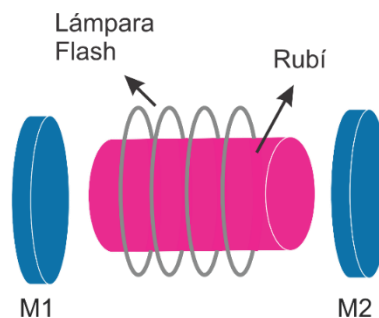
	Página
Resumen español .....	ii
Resumen inglés .....	iii
Dedicatorias .....	iv
Agradecimientos .....	v
Contenido .....	viii
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Motivación de la tesis .....	2
1.2 Estructura de la tesis .....	3
<b>Capítulo 2. Principios de funcionamiento de un láser</b> .....	<b>5</b>
2.1 Fundamentos de óptica .....	5
2.2 Cavity láser .....	8
2.3 Emisión estimulada .....	10
2.4 Inversión de población en un sistema de 4 niveles .....	12
2.5 Parámetros para la caracterización de un láser .....	18
2.5.1 Ancho de banda .....	18
2.5.2 Modulación Q .....	22
2.5.3 Eficiencia-pendiente .....	24
2.5.4 Calidad espacial de un haz .....	25
<b>Capítulo 3. Metodología</b> .....	<b>26</b>
3.1 Diseño de la cavity láser .....	26
<b>Capítulo 4. Resultados</b> .....	<b>33</b>
4.1 Fabricación y caracterización del láser .....	33
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	<b>42</b>
<b>Referencias</b> .....	<b>44</b>

# CAPÍTULO I.

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

El láser es un dispositivo que emite radiación coherente e intensa a diferentes frecuencias del espectro electromagnético y es sin duda uno de los grandes inventos del siglo XX ya que por la gran cantidad de aplicaciones que tiene, contribuyó a la gran industrialización que se ha vivido a lo largo de los años. *El LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, por sus siglas en inglés), o amplificación de luz por emisión estimulada de radiación*, es la generación de un haz de luz utilizando el fenómeno de emisión estimulada en un medio activo, este fenómeno se explica con detalle en el capítulo 2. La historia de los láseres inició alrededor de 1915 cuando uno de los grandes físicos de la historia, Albert Einstein, estudió los conceptos aplicados en las leyes de radiación de Max Planck e idealizó la posibilidad de crear un haz de luz continua y coherente al que llamó *emisión estimulada*. En 1960, Theodore H. Maiman utilizó un cristal de rubí sintético en forma de barra colocado en una cavidad óptica formada por dos espejos altamente reflejantes y bombeado por una lámpara muy intensa (flash-lamp), para fabricar el primer láser tal y como se conoce hasta hoy (Maiman, 1960). En la Figura 1 se muestra un dibujo de este láser.



**Figura 1.** Muestra un dibujo de la primera cavidad que logra emitir un haz de luz láser, compuesta por una barra de Ruby (medio de ganancia), un tubo de bombeo óptico (lámpara flash), dos espejos  $M_1$  y  $M_2$ .

Una vez fabricado el primer láser, científicos de todo el mundo se enfocaron en el desarrollo de estos dispositivos láseres que utilizaban diversos medios de ganancia, como por ejemplo los láseres basados en gas, en cristal o en semiconductores con el propósito de obtener fuentes de luz de diferentes longitudes de onda más eficientes, cada una con sus respectivas propiedades de emisión, ventajas y desventajas. Incluso se ha trabajado en la generación de materiales sintéticos que permitan alcanzar longitudes de onda de emisión que no se encuentran en los materiales existentes. Hoy en día los láseres se han vuelto tan indispensables que pueden encontrarse en una gran cantidad de dispositivos de uso común como en equipos de cómputo, consolas de videojuegos y en dispositivos de comunicaciones ópticas (Sun et al., 2018). Incluso se encuentran en dispositivos más sofisticados como en sensores de movimiento y en herramientas uso médico. Aunque existe una gran cantidad de láseres comerciales, el desarrollo de nuevos materiales que podrían ser de utilidad como medio de ganancia y por ende obtener láseres con diferentes propiedades, hace que éstos sean de interés en algunas áreas de investigación y aplicación.

## **1.2 Motivación de la tesis**

La Bioingeniería, es una disciplina que combina las ciencias de la salud y de la ingeniería con el fin de ofrecer soluciones en el área de bioinstrumentación o biotecnología, por este motivo se hace propio de esta disciplina el buscar nuevas aplicaciones y mejoras de diferentes instrumentos de uso biomédico por ejemplo los láseres en el sector clínico y quirúrgico (Lee et al., 2006). Los láseres más usados en el área de medicina y cirugía, suelen ser gaseosos y excitados eléctricamente, cada tipo de laser es específico para cada aplicación por su longitud de onda ya que cada tejido del cuerpo humano es diferente y por lo tanto su absorción cambia en cada una, los más comunes son el de argón o el láser de CO<sub>2</sub>, y se utilizan en múltiples aplicaciones como en el corte de tejidos (en sustitución de un bisturí) y en la coagulación de vasos sanguíneos (Omi & Numano, 2014). El láser de gas argón emite a una longitud de onda en el visible produciendo un haz de luz azul verdosa; lo que lo hace muy útil para uso

en Oftalmología, neurocirugía y en gastroenterología. El láser de CO<sub>2</sub> es el mejor instrumento para cortar y vaporizar los tejidos, es una luz invisible, con longitud de onda de 10.6<sub>μm</sub>, en la región infrarroja del espectro electromagnético. El Láser Nd:YAG utiliza un cristal de Neodimio Ytrio, Aluminio y Granate para producir haces invisibles con frecuencia de 1064nm (Kane & Byer, 1985). Debido a su longitud de onda de emisión puede transmitirse por medio de fibras ópticas con bajas pérdidas, lo que los hace útiles para analizar cavidades a través de endoscopios. Además se utiliza para tratamiento de lesiones del esófago, estómago y colon; en urología, para las lesiones intravesicales; en oftalmología, en oncología, en neurocirugía y en neumología para las lesiones traqueo bronquiales (Bittencourt et al., 2017). La interacción del láser con los tejidos depende de su capacidad de concentrar la luz, producir calor en un punto determinado para causar la ebullición del agua de las células y hacerlas estallar. De esta forma se pueden coagular, cortar o vaporizar los tejidos. Cuando se reduce la potencia y la temperatura, es posible fundir las proteínas y unir firmemente o soldar los tejidos.

La gran cantidad de aplicaciones que tiene los láseres en el campo de la biomédica e investigación es la principal motivación de este trabajo, aunque existe muchos láseres comerciales, estos suelen ser muy costosos por lo que el desarrollar uno propio puede ser de gran utilidad ya que es más económico y se le pueden realizar modificaciones para adecuarlo a diferentes aplicaciones como doblar su frecuencia para cambiar la longitud de onda de emisión, o pasarlo de emisión continua a pulsada con solo agregar elementos dentro de la cavidad láser. El objetivo de este trabajo es el de fabricar y optimizar un láser de estado sólido que emite en el infrarrojo cercano que pueda ser utilizado en aplicaciones de Bioingeniería.

### **1.3 Estructura de la tesis**

En el capítulo 2 de este documento se explican los principios de funcionamiento de los láseres, así como los elementos que los conforman. En el capítulo 3 se muestra la metodología utilizada para fabricar el láser que aquí se presenta, esta metodología contempla el diseño de la cavidad, la selección y explicación de los materiales, los

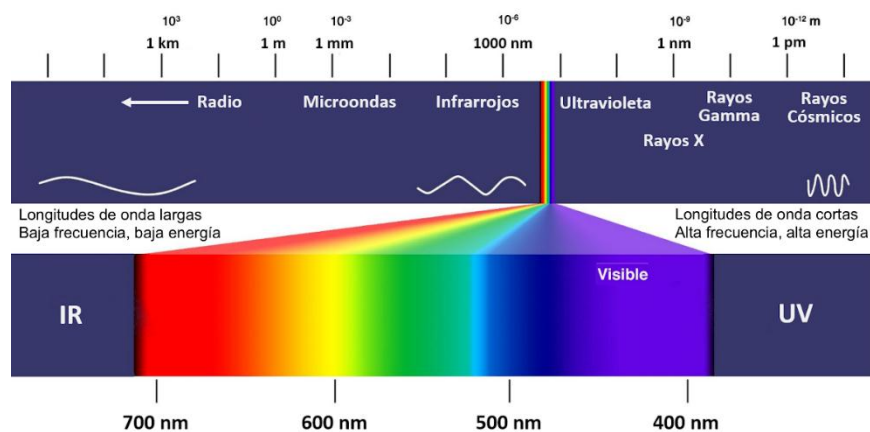
elementos utilizados para la construcción de la cavidad y las condiciones y variables que se superaron para lograr tener una emisión láser adecuada. En el capítulo 4 se describen los resultados obtenidos de la emisión láser producida por la cavidad de estado sólido, los datos mostrados son resultado de la caracterización de haz de luz por medio de sensores de potencia, espectrómetro y otras técnicas de medición. Por último, en el capítulo 5 se muestran las conclusiones del trabajo, en este apartado se discuten los datos finales y las aplicaciones del láser en el campo de la bioingeniería.

## CAPÍTULO 2.

### Principios de funcionamiento de un láser

#### 2.1 Fundamentos de óptica.

La luz podría definirse como radiación electromagnética que se comporta de manera dual, como una onda que tiene frecuencia, longitud de onda y fase; o como un fotón que tiene una onda asociada. Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o longitudes de onda. El instrumento que las clasifica según su longitud de onda o frecuencia se conoce como espectro electromagnético, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Espectro electromagnético. Muestra la clasificación de las ondas electromagnéticas según su longitud de onda.

El espectro electromagnético contempla un vasto intervalo de longitudes de onda pero el ser humano solo puede observar una pequeña fracción de este, a la cual se le conoce como espectro visible y comprende un intervalo de 400 a 700nm. La clasificación de las ondas se basa en su energía la cual está cuantizada por  $E = hc = \frac{hc}{\lambda}$ , donde  $h$  es la constante de Planck y es igual a  $6.626 \times 10^{-34}$  J.s, y  $c$  es la constante de velocidad de la luz en el vacío igual a  $3 \times 10^8$  m/s. La relación entre la frecuencia y la longitud de onda de un fotón está dada por la relación  $c = \lambda f$ .

Cuando interactúa un haz de luz con un medio transparente, pueden ocurrir algunos fenómenos lineales como, refracción y reflexión; y estos fenómenos se deben principalmente a un parámetro conocido como índice de refracción denotado por  $n$ . El índice de refracción es una propiedad de los materiales que depende tanto de la temperatura del medio, como de la longitud de onda que lo atraviese y está dado por,

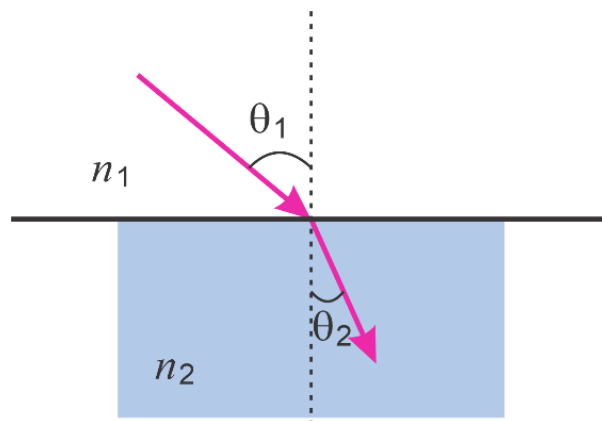
$$n = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}, \quad (1)$$

donde  $\mu_r$  es la permeabilidad relativa del medio y  $\epsilon_r$  es la permitividad relativa del medio. También puede definirse a  $n$ , como la razón entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz dentro del medio, es decir:  $n = \frac{c}{v}$ .

El fenómeno de *refracción de la luz* es el cambio de dirección que sufre un haz de luz cuando se propaga por un medio y se rige por la Ley de Snell, dada por,

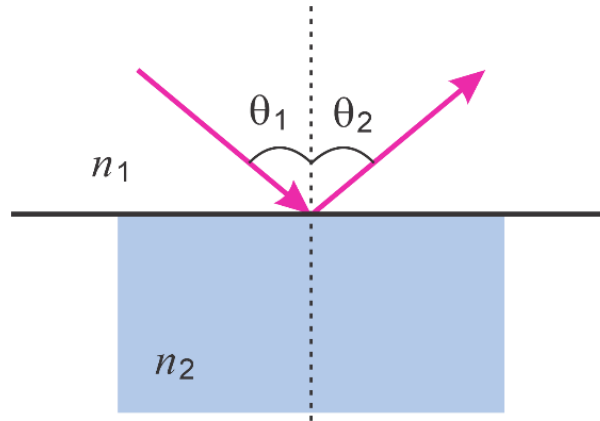
$$n_1 \text{Sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2, \quad (2)$$

donde  $n_1$  es el índice de refracción del medio donde se encuentra el haz incidente,  $\theta_1$  es el ángulo de incidencia que se forma con la normal a la superficie,  $n_2$  es el índice de refracción del medio donde se propaga el haz, y  $\theta_2$  es el ángulo de refracción que se forma con la normal a la superficie como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Muestra el fenómeno de refracción, es la desviación de un haz de luz cuando éste viaja de un medio a otro de diferente índice de refracción por ejemplo de aire a vidrio.

El fenómeno de reflexión es el cambio de sentido que sufre un rayo de luz cuando se propaga de un medio a otro de diferente índice de refracción, la ley de reflexión establece que un rayo incidente se refleja con el mismo ángulo que con el que incide, es decir,  $\theta_1 = \theta_2$  como se muestra en la figura 4.



**Figura 4.** Fenómeno de reflexión de la luz, la luz sufre un cambio de sentido cuando viaja de un medio a otro.

El porcentaje de la potencia o intensidad de la luz que se reflejará depende también de los índices de refracción de los medios por los que se propaga el haz de luz y está determinado por la ecuación de Fresnel, dada por,

$$R_f = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2. \quad (3)$$

La ecuación 3 permite determinar las pérdidas de potencia que sufriría un haz cada que cambie de un medio a otro por ejemplo, un haz de luz atravesando un vidrio de ventana con índice de refracción de 1.52, rodeado por aire con índice de refracción de 1, en la interfaz de entrada, tendrá una fracción de pérdidas,  $R_f = \left( \frac{1.52 - 1}{1.52 + 1} \right)^2 = 0.0426$ , es decir, se pierde alrededor de 4.26% en cada interfaz, al atravesar el vidrio una sola vez, el haz perdería el 8.52% de su potencia óptica.

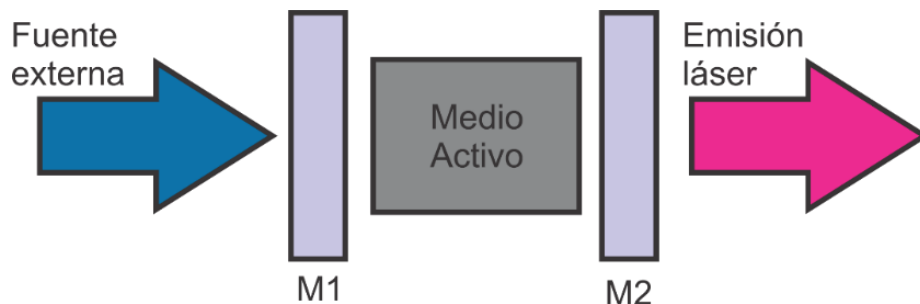
Las pérdidas por reflexión representan un problema en aplicaciones donde se utiliza un medio colocado entre dos espejos ya que la luz viajaría una gran cantidad de veces a través del medio, afectando la potencia o energía suministrada al dispositivo.

Para resolverlo, se aplica películas delgadas antirreflejantes en las caras de incidencia del medio. A la fracción de radiación incidente reflejada por un medio, se le conoce como *Reflectividad* y puede tomar valores de 0 a 1.

## 2.2 Cavity láser

El láser es un tipo de fuente luminosa con ciertas propiedades físicas que lo diferencian de una fuente de luz convencional. Una fuente de luz convencional como la que se observa al encender un foco o LED genera radiación electromagnética que está formada por diversas longitudes de onda (colores) y se propaga en todas las direcciones lo cual es una característica de la luz no coherente. En cambio, la luz láser se caracteriza por ser monocromática y coherente tanto de forma temporal como espacial por lo que es intensa y se propaga en una sola dirección. La coherencia podría definirse como la capacidad de una onda para mantener su forma, por ejemplo una onda es coherente temporalmente si sus puntos mantienen una relación de fase constante. Debido a estas propiedades es que tiene tantas aplicaciones, ya que su trayectoria puede ser manipulada o enfocada a través de la implementación de arreglos ópticos formados por diferentes componentes como espejos o lentes.

Un láser se fabrica en su forma más simple bombeando con una fuente externa (e.g. corriente eléctrica, otro láser o una lámpara intensa) un medio activo o medio de ganancia colocado entre dos espejos, como se muestra en la Figura 5.

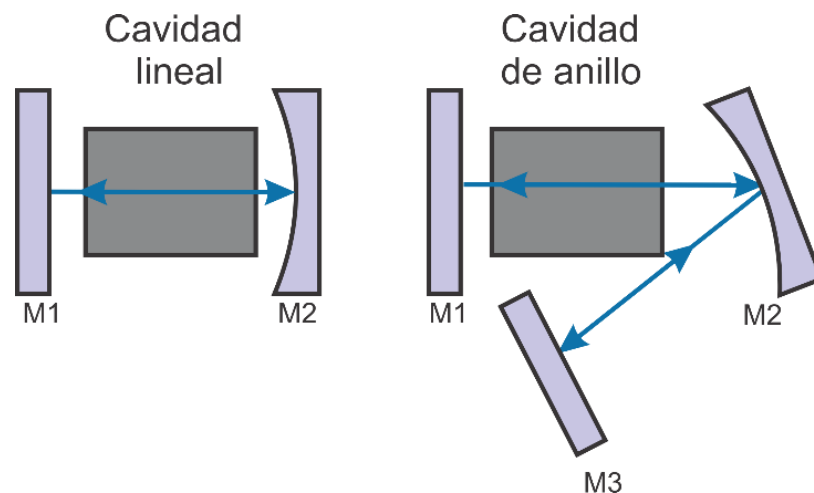


**Figura 5.** Muestra la forma general de fabricar un láser es colocando un medio activo entre dos espejos con ciertas propiedades de reflectancia, el medio activo es bombeado por un fuente externa.

Puede observarse que el láser de la Figura 5 es muy similar al fabricado por Mainman en 1960 (Mainman, 1960), solo que en el caso de la figura se utiliza bombeo longitudinal y en el caso del láser de rubí se utilizó bombeo transversal a lo largo de la barra de cristal.

Existen diferentes formas de clasificar los láseres, dependiendo de sus propiedades temporales de emisión pueden ser pulsados, continuos o cuasi-continuos. Además la longitud de onda de emisión depende entre otras cosas de las propiedades de absorción y de emisión del medio de ganancia que se utilice, así, pueden clasificarse en: a) *Láseres orgánicos*, los cuales utilizan un solvente que contiene colorantes orgánicos, b) *Láseres de gas*, que utilizan un gas o una mezcla de gases como medio activo, por ejemplo los láseres de helio-neón (He-Ne) o láseres de argón (Ar), c) *Diodos láser* que utilizan un material semiconductor como medio activo como el Arsenuro de galio (GaAs) o Fosforo de indio (InP); y d) *Láseres de estado sólido* los cuales utilizan un cristal natural o sintético como medio activo, por ejemplo el láser de rubí, Granate de aluminio e itrio dopado con neodimio (Nd:YAG) y Ortovanadato de itrio dopado con neodimio (Nd:YVO<sub>4</sub>).

Además existen básicamente dos tipos de cavidades láser, la cavidad lineal y la cavidad de anillo como se observa en la Figura 6.



**Figura 6.** Tipos de cavidades básicas para construir un láser. La cavidad lineal utiliza combinaciones de dos espejos, por ejemplo, dos espejos planos, espejo plano-espejo cóncavo, o dos espejos cóncavos. La Cavidad de anillo utiliza 3 o más espejos en diferentes combinaciones plano-cóncavas, la combinación depende del propósito del láser.

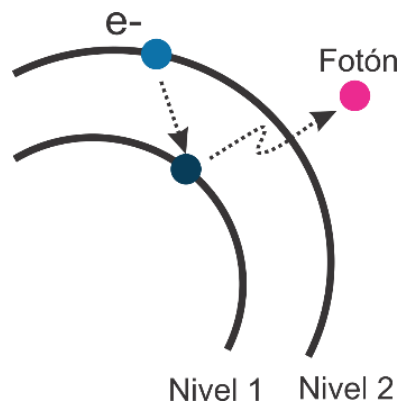
La cavidad lineal o también llamada de onda estacionaria está formada por dos espejos y en ella la luz puede viajar de ida y vuelta muchas veces entre estos espejos, es también llamada de onda estacionaria debido a que las ondas viajando de un espejo a otro, forman un patrón de nodos y antinodos (Barlow et al., 2015). La cavidad de anillo se construye con tres o más espejos y en ella la luz puede circular en dos diferentes direcciones, lo que permite tener dos diferentes salidas si se eligen los espejos con la reflectividad adecuada.

La función de la cavidad óptica formada por los dos espejos es la de proporcionar retroalimentación para que la amplificación, sea más eficiente. Hablando de un bombeo óptico que es el que se utilizó en esta tesis, el espejo acoplador de entrada  $M_1$ , debe ser altamente reflejante a la longitud de onda de emisión láser (idealmente debería ser 100% reflejante para que no existan pérdidas por reflexión), y altamente transparente a la longitud de onda de bombeo. El espejo acoplador de salida  $M_2$ , debe ser altamente transparente a la longitud de onda de bombeo y tener una reflectancia (% de reflectividad) específica a la longitud de onda de emisión láser, esta reflectancia deberá ser tal, que ofrezca retroalimentación pero que así mismo deje salir un poco de la emisión láser. El valor de esta reflectancia dependerá de los componentes del láser que se esté fabricando. En la fabricación de un láser, la cavidad óptica determina las principales características de la emisión láser, su geometría establece el ancho de banda de emisión, la forma espacial del haz emitido y la dirección de la emisión láser; y el medio activo básicamente proporciona la ganancia cuando se le hace incidir una fuente externa. No obstante para comprender a profundidad el funcionamiento de un láser es necesario conocer algunos términos y procesos importantes los cuales se abordan en las siguientes secciones.

## **2.3 Emisión estimulada**

La emisión estimulada es el proceso fundamental para la emisión láser. Para comprender este proceso es importante recordar que la materia se encuentra constituida por átomos, a grandes rasgos, un átomo consiste de un núcleo compuesto de protones y neutrones, alrededor del cual giran electrones con energías específicas.

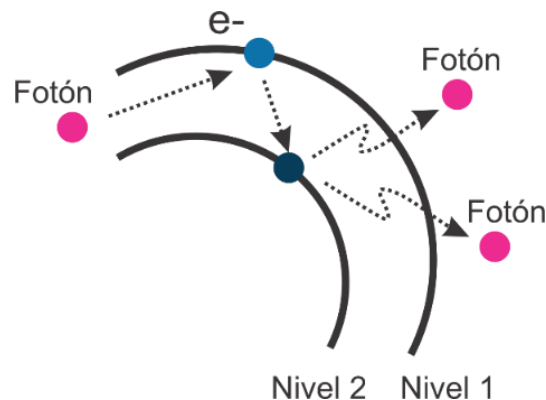
Los electrones no pueden poseer cualquier energía, únicamente valores bien definidos que se llaman niveles electrónicos. Un electrón puede pasar de un nivel de energía a otro emitiendo o absorbiendo un paquete de energía llamado fotón, esta energía emitida o absorbida es igual a la diferencia entre los dos niveles en que se da la transición. Cuando interactúa una fuente de excitación externa (e.g. calor, corriente, luz) con un material o medio de ganancia ocurren básicamente dos tipos de emisión, emisión espontánea y emisión estimulada. Si un átomo activo en el medio de ganancia se encuentra en un estado excitado, después de un tiempo puede descomponerse espontáneamente en un nivel de energía más bajo liberando energía en forma de fotón y emitiéndola en una dirección aleatoria, a este proceso se le conoce como emisión espontánea, como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Muestra el proceso de emisión espontánea. Un átomo excitado en un nivel de energía superior, decae a un nivel de energía inferior liberando energía en forma de fotón con dirección aleatoria.

Por otro lado, también puede ocurrir que la emisión de fotones sea estimulada por fotones entrantes si es que éstos tienen una energía adecuada, a este proceso se le conoce como emisión estimulada, en la Figura 8 se muestra este proceso. En este caso, se emite un fotón con las mismas propiedades físicas (i.e. longitud de onda, fase y frecuencia) del fotón incidente y la potencia de la radiación se amplifica. La velocidad del proceso de emisión estimulada para un átomo excitado se puede calcular a través del producto de la sección transversal del material  $\sigma$ , y el flujo de fotones  $\Phi$ , es decir el

número de fotones por unidad de área y tiempo. Debido a que en la emisión estimulada el nuevo fotón emitido adquiere las mismas propiedades que el fotón, la luz generada es coherente tanto espacial como temporalmente y además es intensa.



**Figura 8.** Muestra el proceso de emisión estimulada. El bombeo externo excita a los átomos del medio activo, provocando un salto en los niveles de energía. Al regresar a su estado original se genera una partícula de luz conocida como fotón que coincidirá con otros átomos, dando como resultado una copia de sí misma.

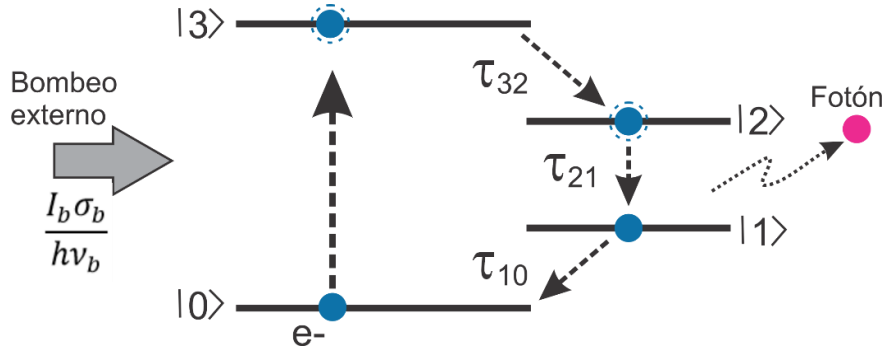
El efecto de amplificación de la emisión estimulada puede reducirse o suprimirse por completo en un medio donde demasiados átomos activos se encuentran en el estado inferior del láser, ya que estos átomos absorben los fotones y por lo tanto atenúan la radiación, es por esto que en un sistema simple la amplificación láser requiere de un fenómeno llamado *inversión de población* (Javan, 1958).

## 2.4 Inversión de población en un sistema de 4 niveles.

La inversión de población podría definirse como un estado de un medio donde un nivel electrónico más alto tiene una población de electrones más alta que el nivel más bajo. Es un estado del sistema que no cumple con el equilibrio térmico ya que en el equilibrio térmico, la población del nivel más bajo siempre es mayor y nunca se puede obtener una ganancia neta positiva. En la mayoría de los láseres de estado sólido, el concepto de inversión de población no es aplicable a todos los materiales,

porque los niveles de energía superior e inferior consisten de un gran número de niveles de energía ligeramente diferentes. Los modelos típicos implican múltiples niveles de nivel superior e inferior que además pueden estar sujetos a una amplificación no homogénea. Por lo que es conveniente utilizar secciones de transición efectivas que tengan en cuenta la distribución térmica de la población dentro de los niveles, sin embargo, en general son diferentes para la absorción y la emisión estimulada (Svelto & Hanna, 2010).

Un sistema láser de estado sólido puede simularse como un sistema de 4 niveles de energía. Un ejemplo de un sistema de 4 niveles es el cristal de Nd:YVO<sub>4</sub> (Ortovanadato de itrio, dopado con neodimio), éste es un cristal sintético donde el YVO<sub>4</sub> es la estructura cristalina que alberga al neodimio, este elemento es el medio activo; tiene alta absorción y una sección transversal grande por lo que generalmente presenta eficiencias de conversión altas. El funcionamiento de un láser de cuatro niveles se muestra en la Figura 9, donde los electrones que se encuentran en equilibrio térmico, es decir en  $|0\rangle$ , son llevados al nivel de energía  $|3\rangle$  utilizando algún sistema de bombeo, en este caso el bombeo óptico proveniente de la radiación de un diodo láser. La velocidad para llevar un electrón al nivel  $|3\rangle$  dependerá de la intensidad  $I_b$  de radiación del láser de bombeo, de la sección eficaz  $\sigma_b$  del medio activo, y de la energía de cada fotón de bombeo,  $h\nu_b$ , de este nivel decaen al nivel  $|2\rangle$  con un tiempo de vida  $\tau_{32}$ , y de éste al nivel  $|1\rangle$  en un tiempo  $\tau_{21}$ . Finalmente caen al nivel  $|0\rangle$  en un tiempo  $\tau_{10}$ , como se muestra en la Figura 9. Los tiempos de vida que cada nivel son tales ( $\tau_{21} \gg \tau_{32}, \tau_{10}$ ) que se forma una inversión de población entre los niveles  $|2\rangle$  al  $|1\rangle$ , con lo cual puede haber amplificación por emisión estimulada y absorción de fotones con energía  $\Delta E = E_2 - E_1$ .



**Figura 9.** Sistema de 4 niveles de energía. La figura muestra las transiciones que debe pasar un electrón para obtener la amplificación láser en un sistema de 4 niveles de energía.

Para calcular las condiciones de umbral de oscilación es necesario contar con ecuaciones que describan la evolución temporal de las poblaciones  $N_0, N_1, N_2$  y  $N_3$  de los diferentes niveles. Considerando solamente los procesos indicados en la Figura 9, las ecuaciones son las siguientes (Barboza et al. 2009):

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{I_b \sigma_b}{h \nu_b} N_0 - \frac{N_3}{\tau_{32}} \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} \quad (5)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_2}{\tau_{21}} - \frac{N_1}{\tau_{10}} \quad (6)$$

$$\frac{dN_0}{dt} = \frac{N_1}{\tau_{10}} - \frac{I_b \sigma_b}{h \nu_b} N_0 \quad (7)$$

Suponiendo que  $\tau_{21} \gg \tau_{32}, \tau_{10}$ , que la inversión de población  $\Delta N = N_2 - N_1 \approx N_2$ , que el bombeo no cambia con el tiempo y que la inversión de población inicial es cero, de las ecuaciones 4 y 5 se obtiene,

$$\Delta N(z, \delta t) \approx N_\infty(z) \left( 1 - \exp \left[ -\frac{\delta t}{\tau_{21}} \right] \right), \quad (8)$$

donde  $N_{\infty}(z) = I_b(z)\sigma_b\tau_{21}/h\nu_b$  y  $\delta t$  es el tiempo durante el cual el medio activo es bombeado. Por otro lado, la intensidad del bombeo no es constante, ya que es absorbido a lo largo de su dirección de propagación. En el caso de este trabajo es un bombeo longitudinal representado por,

$$I_b(z) = I_b(0)\exp(-\alpha_b z), \quad (9)$$

donde  $\alpha_b$  es la absorción del haz de bombeo por unidad de longitud, la cual está dada por  $\sigma_b = N_b\sigma_b$ . La ganancia por unidad de longitud está dada por,

$$\gamma = \Delta N\sigma_L, \quad (10)$$

donde  $\sigma_L$  es la sección eficaz de la emisión estimulada entre los niveles  $|2\rangle$  y  $|1\rangle$ . Agrupando las ecuaciones 8 y 10 se obtiene:

$$\gamma(z, t) = \frac{I_b(0)}{I_{sat}}\eta_c\alpha_b\exp[-\alpha_b z]\Phi(t) \quad (11)$$

donde  $I_{sat}$  es la intensidad de saturación, dada por  $I_{sat} = h\nu_L/\sigma_L\tau_{21}$ , y  $\eta_c$  es la eficiencia cuántica, dada por  $\eta_c = \lambda_b/\lambda_L$ , donde  $\lambda_b$  y  $\lambda_L$  son las longitudes de onda del bombeo y de la emisión láser, respectivamente.  $\Phi(t)$  es una función que depende del tiempo, dada por  $\Phi(t) = 1 - \exp(-\frac{t}{\tau_{21}})$ .

El umbral se alcanza cuando la ganancia de un recorrido de ida y vuelta es igual a las pérdidas totales de la cavidad. Si ahora se calcula ganancia de un haz viajando en la dirección positiva de  $z$ . La intensidad de este haz, denotado por  $I^+(z)$ , se determina con la ecuación:

$$\frac{dI^+}{dz} = \gamma(z, t)I^+ = \frac{I_b(0)}{I_{sat}}\eta_c\alpha_b\exp[-\alpha_b z]\Phi(t)I^+ \quad (12)$$

Integrando la ecuación 9 de 0 a  $L$ , la longitud del medio, se obtiene;

$$I^+ = I^+(0) \exp \left[ \frac{I_b(0)}{I_{sat}} \eta_c \Phi(t) (1 - \exp(-\alpha_b L)) \right] = I^+(0) \exp \left[ \frac{I_b(0)}{I_{sat}} \eta_c \Phi(t) f \right]. \quad (13)$$

En este caso  $f = 1 - \exp(-\alpha_b L)$ ; es la fracción de la potencia del haz de bombeo que fue absorbida por el medio. Realizando un análisis similar para el haz que viaja en la dirección contraria, cuya intensidad es  $I^-(z)$ , se obtiene:

$$I^-(0) = I^-(L) \exp \left[ \frac{I_b(0)}{I_{sat}} \eta_c \Phi(t) f \right]. \quad (14)$$

A su vez, las intensidades de ambos haces están relacionados en los planos donde se encuentran los espejos por  $I^+(0) = R_1 I^-(0)$  y  $I^-(0) = R_2 I^+(0)$ . Utilizando estas relaciones, las ecuaciones (13 y 14), y suponiendo que hay pérdidas pasivas dentro de la cavidad dadas por  $\exp(-\alpha)$ , se puede encontrar que la intensidad después de un recorrido de ida y vuelta está dada por:

$$I^+(0)_{ida\ y\ vuelta} = I^+(0) R_1 R_2 \exp \left[ \frac{2I_b(0)}{I_{sat}} \eta_c \Phi(t) f - \alpha_L \right]. \quad (15)$$

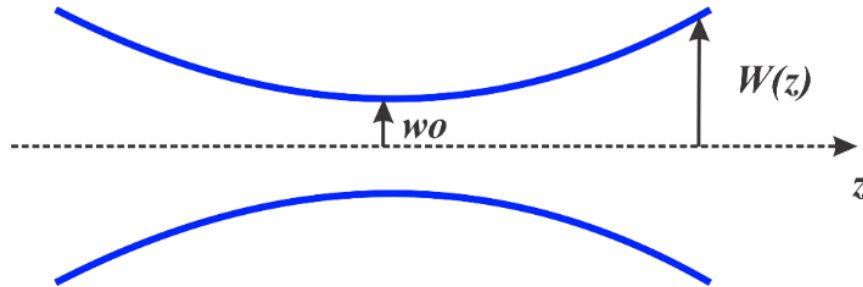
En el umbral de oscilación la intensidad después de un recorrido de ida y vuelta es igual a la inicial, por lo que la condición de umbral de oscilación es:

$$R_1 R_2 \exp \left[ \frac{2I_b(0)}{I_{sat}} \eta_c \Phi(t) f - \alpha_L \right] = 1. \quad (16)$$

Con esta ecuación se puede calcular la reflectancia mínima del espejo acoplador de salida necesaria para que haya oscilación láser. En el caso estacionario,  $t \rightarrow \infty$  y según su definición  $\Phi(t) \rightarrow 1$ . De la ecuación 16, se observa que la reflectancia mínima del espejo acoplador es:

$$R_2^{m\acute{a}xima} = \frac{1}{R_1} \exp \left[ \alpha_L - \frac{2P_b(0)\sigma_L\lambda_b}{\pi w^2 hc} \delta t f \right] \quad (17)$$

donde  $P_b$  es la potencia de bombeo y  $w$  es el radio promedio del haz a lo largo de  $z$ . Como se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** La figura muestra los parámetros que caracterizan a un haz gaussiano.

Como puede observarse en la ecuación 17 el material utilizado como medio activo afectará la facilidad de excitación de los electrones y la probabilidad de que se lleve a cabo la emisión de fotones (dependen de la sección eficaz, absorción del material). Por esta razón es importante conocer las propiedades de absorción y de emisión del material que se vaya a utilizar. Para lograr que los electrones se encuentren en un estado de excitación es posible recurrir a varios métodos, por ejemplo el “bombeo óptico” el cual consiste en inyectar de fotones (haz de luz) al sistema, esto con la finalidad de producir una reacción de saltos en los electrones que conforman los átomos de un nivel de baja energía a un nivel de alta energía. Existen básicamente dos formas diferentes de bombear ópticamente un material, una lámpara pulsada muy intensa o “flash-lamp” o utilizando otro láser. En este caso se utilizará un diodo láser que emite en el infrarrojo cercano.

## 2.5 Parámetros para la caracterización de un láser

### 2.5.1 Ancho de banda

El espectro óptico (o espectro de emisión) de una fuente de luz o de un haz contiene información sobre cómo se distribuye la energía o la potencia sobre diferentes longitudes de onda. Usualmente, se presenta en la forma de un diagrama donde la densidad de potencia espectral se grafica en función de la longitud de onda o de la frecuencia óptica.

El ancho de banda de un haz láser es el ancho de algunas frecuencias o el intervalo de longitudes de onda que éste contiene. Una fuente de luz puede tener un ancho de banda (o ancho de línea), refiriéndose al ancho del espectro óptico de emisión. Los láseres de ancho de línea angosto donde el ancho de banda puede ser extremadamente pequeño. Y por otro lado, pulsos ultracortos con pulsos con duración de algunos femtosegundos pueden tener un ancho de banda ancho.

Un ancho de banda óptico puede ser el ancho de un intervalo de frecuencias que pueden ser manipulados por un elemento óptico o dispositivo fotónico. Por ejemplo, el ancho de banda de un espejo, o el ancho de banda de transmisión de una fibra óptica.

Una definición común del ancho espectral es la mitad de máximo (FWHM, Full Width at Half Maximum), los valores de ancho de banda se especifican en términos de frecuencia o longitud de onda. Debido a la relación inversa entre la frecuencia y la longitud de onda, el factor de conversión entre gigahertz y nanómetros depende de la longitud de onda central del haz. Para convertir un intervalo de longitudes de onda en un intervalo de frecuencia se puede utilizar la ecuación,  $\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$ , donde  $\Delta\nu$  es el ancho de banda en frecuencia y  $\Delta\lambda$  el ancho de banda en términos de longitud de onda. En base a la definición de ancho de banda se puede determinar que está fuertemente relacionado a la coherencia temporal del haz.

Para fines de conocer el ancho de banda del haz de luz emitido es indispensable conocer el tiempo de vida de un fotón dentro de la cavidad láser, para tal efecto considere una cavidad láser estable o inestable y suponga por generalidad que algunas pérdidas diferentes a la difracción están presentes. Por ejemplo, se podrían tener pérdidas debido a que el porcentaje de reflexión de los espejos es menor al 100% o pérdidas por esparcimiento en algunos elementos ópticos dentro de la cavidad. Bajo estas condiciones se desea calcular la razón de decaimiento de energía en la cavidad. Entonces que  $I_0$  es la intensidad inicial correspondiente al campo  $\bar{E}(x_1, y_1, 0)$  a una coordenada transversal dada  $x_1, y_1$ . Sean  $R_1$  y  $R_2$  las reflectividades de los dos espejos que forman y  $T_i$  la fracción de pérdidas internas por cada viaje de ida y vuelta. La intensidad  $I(t_1)$  al mismo punto  $x_1, y_1$  a un tiempo  $t_1 = 2L/c$ , es decir el tiempo que le toma al dar un viaje de ida y vuelta en una cavidad de longitud  $L$ , será (Svelto & Hanna, 2010),

$$I(t_1) = R_1 R_2 (1 - T_i)^2 I_0. \quad (18)$$

Debido a que  $T_i$  está definido como una fracción de las pérdidas internas por viaje, la intensidad es reducida por un factor de  $(1 - T_i)$  en un solo viaje y por lo tanto por un factor  $(1 - T_i)^2$  en un viaje redondo. La intensidad en la misma coordenada transversal, después de  $m$  viajes de ida y vuelta, es entonces,

$$I(t_m) = [R_1 R_2 (1 - T_i)^2]^m I_0. \quad (19)$$

Si se define a  $\phi(t)$  como el número total de fotones en un haz dentro de la cavidad a un tiempo  $t$ . Si se asume que el haz mantiene su distribución después de un viaje de ida y vuelta, entonces se podría establecer que  $\phi(t) \propto I(t)$ , Entonces la ecuación 19 se puede escribir,

$$\phi(t_m) = [R_1 R_2 (1 - T_i)^2]^m \phi_0 \quad (20)$$

donde  $\phi_0$  es el número de fotones presentes inicialmente en la cavidad. Si se define a  $\phi(t_m) = [\exp(-t/\tau_c)]\phi_0$ , donde  $\tau_c$  es una constante. Entonces la ecuación 20 es,

$$\exp(-2mL/c\tau_c) = [R_1R_2(1 - T_i)^2]^m, \quad (21)$$

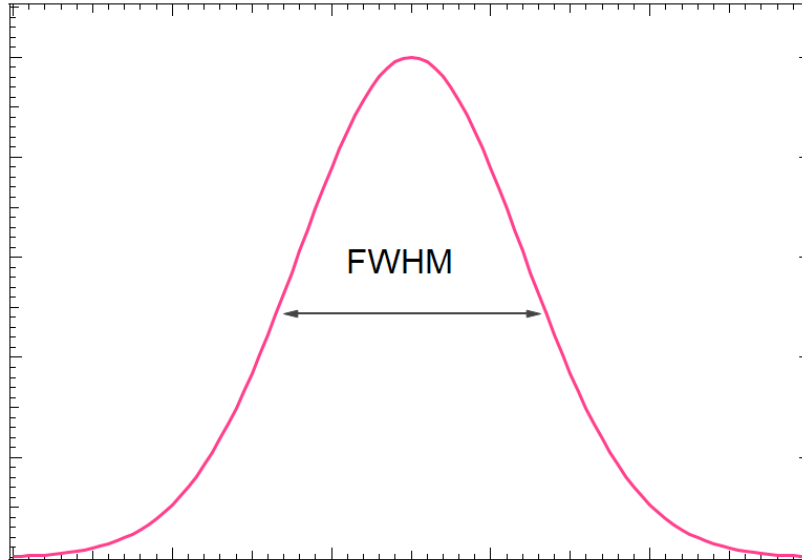
despejando para  $\tau_c$ ,

$$\tau_c = -\frac{2L}{c} \ln[R_1R_2(1 - T_i)^2]. \quad (22)$$

Si ahora se asume que la ecuación 20 es válida para valores de  $t > 0$  y no solo para  $t_m$ , se puede escribir entonces,

$$\phi(t) \cong \exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right)\phi_0. \quad (23)$$

Siendo entonces la ecuación 22 la relación para el tiempo de vida del fotón dentro de la cavidad. Al calcular el tiempo de vida del fotón generado dentro de la cavidad, el comportamiento del campo eléctrico en cualquier punto dentro del resonador, reescribirse como  $E(t) = \bar{E} \exp\left[\left(-\frac{t}{2\tau_c}\right) + j\omega t\right]$ , donde  $\omega$  es la frecuencia angular de un haz. El mismo comportamiento temporal para todo el campo de la onda que sale de la cavidad a través de uno de los espejos. Para calcular el espectro de potencia de este campo, se aplica la transformada de Fourier, y se puede encontrar que la luz emitida tiene la forma de una función Lorentziana, como se muestra en la figura 11.



**Figura 11.** Función Lorentziana, muestra el espectro de densidad de potencia de un campo eléctrico al salir de una cavidad óptica, el FWHM (Full Width at Half Maximum) representa el ancho de banda del haz de luz.

El ancho de línea de la función Lorentziana (FWHM) está dado por,

$$\Delta\nu_c = \frac{1}{2\pi\tau_c}. \quad (24)$$

Una vez que se ha encontrado cómo calcular el tiempo de vida del fotón dentro de la cavidad  $\tau_c$ , es momento de definir el factor de calidad Q, de una cavidad óptica. Para cualquier sistema resonante y en particular para una cavidad óptica resonante, este factor se define como  $Q = 2\pi(\text{energía almacenada}/\text{energía perdida en una oscilación})$ . Esto significa que entre mayor sea el factor Q, la cavidad tiene menos pérdidas. En el caso del resonador óptico la energía almacenada es,  $\phi h\nu$  y la energía perdida en un ciclo es,  $h\nu \left(-\frac{d\phi}{dt}\right) \left(\frac{1}{\nu}\right) = -hd\phi/dt$  se obtiene,

$$Q = -2\pi\nu\phi / \left(\frac{d\phi}{dt}\right) \quad (24)$$

de la ecuación 23, se tiene,

$$Q = \nu/\Delta\nu_c. \quad (25)$$

de acuerdo a la ecuación 25 se puede interpretar el factor Q de la cavidad como la razón entre la frecuencia de resonancia  $\nu$ , y el ancho de línea de un modo dado,  $\Delta\nu_c$ .

Al hablar de una cavidad formada por uno o más espejos esféricos se debe cumplir con la condición de estabilidad ya que estos tienen un radio de curvatura finito y por lo tanto una distancia focal definida, es decir, después de cierta distancia el haz propagándose dentro de la cavidad va a divergir y no se podrá obtener oscilación láser. Esta condición está determinada por la longitud de la cavidad  $L$ , y el radio de curvatura de los espejos  $R_1$  y  $R_2$ , de la siguiente forma (Kogelnik & Li, 1966),

$$0 < \left(1 - \frac{L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) < 1. \quad (26)$$

Suponga que se tiene una cavidad plano-cóncava, como es el caso del láser de esta tesis, donde el radio de curvatura del espejo de entrada es infinito ya que es plano, y el radio de curvatura para el espejo de salida es de 50mm, en esta caso el primer término de la multiplicación en la ecuación 26 es igual a 1, por lo tanto para cumplir con la condición de estabilidad y que exista oscilación láser, la longitud de la cavidad, debe ser menor a 50mm.

### **2.5.2. Modulación Q**

En algunas aplicaciones principalmente en medicina, se requieren de láseres pulsados debido a que pueden entregar enormes cantidades de potencia óptica por unidad de tiempo (W.s); una técnica muy común para hacer pulsar un láser es a través de la modulación de su factor Q, es decir, a través de la modulación de las pérdidas de la cavidad. A esta técnica se le llama "Q-Switching" y básicamente consiste en introducir un elemento óptico dentro de la cavidad láser; debido a las pérdidas que

introduce este elemento, el láser deja de emitir luz sin embargo, sigue existiendo amplificación de emisión estimulada ya que el bombeo al medio activo se sigue suministrando, siendo el dispositivo óptico el que absorbe y almacena la energía; después de un cierto tiempo, el elemento óptico se satura y la ganancia supera las pérdidas y se emite la energía almacenada en el elemento óptico en forma de pulso. Esta técnica permite obtener pulsos del orden de nanosegundos y energías del orden de los mili Joules. La duración de los pulsos así como su frecuencia de repetición dependerá del modulador Q, que se utilice. Existen moduladores activos y pasivos. Los moduladores activos utilizan un voltaje externo para funcionar, por ejemplo, los moduladores electro-ópticos que cuales utilizan el efecto electro-óptico en un cristal, en este caso cuando se aplica un voltaje externo al cristal colocado dentro de la cavidad, cambia su índice de refracción produciendo pérdidas, cuando se apaga el voltaje, el índice vuelve a ser el mismo y se emite la energía que se almacenó mientras se aplicaba el voltaje, si se le aplica un tren de pulsos al cristal, entonces se estarían “encendiendo” y “apagando” las pérdidas, obteniéndose entonces pulsos del láser. Existen otros tipos de moduladores activos que funcionan bajo otro principio por ejemplo los espejos giratorios o cristales acusto-ópticos. La ventaja de este tipo de dispositivos es que se pueden controlar las frecuencias de repetición según se requiera.

Un modulador pasivo es un cristal también llamado absorbedor saturable, este tipo de modulador no requiere de voltaje externo por lo que permiten fabricar láseres pulsados más compactos, la duración de los pulsos y la frecuencia de repetición depende de la respuesta del cristal. Un ejemplo de absorbedor saturable es el cristal Cr:YAG (YAG dopado con Cromo). Comparado con el “Q-switching” activo, el “Q-switching pasivo” es muy efectivo y es útil para frecuencias de repetición muy altas (del orden de los MHz), sin embargo la energía por pulso que puede obtenerse es generalmente pequeña, del orden de los micro Joules. La técnica a utilizar dependerá de la aplicación para la que se fabrique el láser. En el caso de esta tesis se utilizó un cristal de Cr:YAG<sup>+4</sup>.

### 2.5.3 Eficiencia-pendiente

En el proceso de fabricación y caracterización de un láser es indispensable determinar su eficiencia de conversión para determinar su potencia de salida. La potencia de salida  $P_s$  tiene una relación lineal con la eficiencia pendiente,  $\eta$ , con la potencia de bombeo  $P_b$  emitida por la fuente externa y con un factor externo llamado potencia de bombeo umbral  $P_b^{umbral}$  que es la potencia mínima necesaria para generar la emisión láser a la salida de la cavidad, esta relación está dada por:

$$P_s = \eta(P_b - P_b^{umbral}), \quad (27)$$

de igual manera se puede observar que  $\eta$ , dado que la ecuación es similar a la ecuación de una recta, expresa una condición de relación entre los cambios de la  $P_s$  y  $P_b$ , por lo que se puede conocer la siguiente ecuación,

$$\eta = \frac{\Delta p_s}{\Delta p_b} \quad (28)$$

La eficiencia pendiente se puede expresar también como  $\eta = \eta_c * \eta_a$ , donde  $\eta_c$  es la eficiencia cuántica y representa a la energía de los fotones producidos por el bombeo láser. Matemáticamente se puede expresar esta eficiencia en términos de longitudes de onda, dando como resultado la siguiente ecuación,

$$\eta_c = \frac{E_L}{E_b} = \frac{\lambda_b}{\lambda_L} \quad (29)$$

donde  $E_L = hc/\lambda_L$  representa la energía de un fotón de láser y  $E_b = hc/\lambda_b$  la energía de un fotón de bombeo,  $h$  es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  J.s), y  $c$ , la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s).

Por otra parte,  $\eta_a$  es la eficiencia de acoplamiento y expresa la capacidad de la cavidad láser de aceptar la potencia de bombeo, esta capacidad se determina

principalmente por las reflectancias de los espejos que forman cavidad láser. Asumiendo que la reflexión por el medio activo es despreciable la eficiencia de acoplamiento puede expresarse como (Paschotta, 2008),

$$\eta_a = \frac{(1-R_2)}{T_i - \ln(R_1) - \ln(R_2)}, \quad (30)$$

donde  $T_i$  representa las pérdidas naturales debido al recorrido generado dentro de la cavidad láser (por efectos de absorción y esparcimiento),  $R_1$  es la reflectancia del espejo de entrada y  $R_2$  la reflectancia del espejo de salida.

#### **2.5.4 Calidad espacial de un haz**

En la caracterización de la calidad del haz emitido por un láser se utiliza el factor  $M^2$  este parámetro determina qué tanto diverge el haz del láser en comparación con la divergencia de un haz gaussiano ideal,  $M^2 = \frac{\theta(\text{real})}{\theta(\text{ideal})}$ . Este parámetro, es importante porque determina qué tanto puede enfocarse un haz y sobre qué distancia permanece enfocado. Por su definición, en un haz ideal  $M^2 = 1$ ; para cualquier haz real  $M^2 \geq 1$ . Para obtener el valor de un haz experimentalmente se hace pasar el haz por una lente convergente, se mide el ancho transversal  $W(z)$  del haz en varios planos antes y después del plano focal de la lente y se ajustan los datos utilizando la técnica de mínimos cuadrados a la siguiente ecuación:

$$W(z) = w_0(z) \sqrt{1 + \left( \frac{(z-z_0)^2 M^4 \lambda^2}{\pi^2 w_0(z)^4} \right)} \quad (31)$$

donde los coeficientes a encontrar son  $z_0$ , que es la distancia en la que se encuentra la cintura del haz, es decir la parte más angosta del haz;  $w_0(z)$ , que representa la cintura del haz y la  $M^2$  (Svelto & Hanna, 2010).

Existen diversos métodos para medir los anchos de haz  $W(z)$  en la sección de resultados se explica con detalle el método utilizado en esta tesis.

# CAPÍTULO 3.

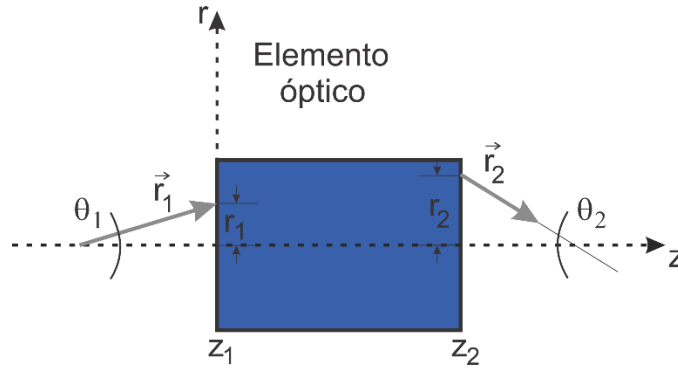
## Metodología

### 3.1 Diseño de la cavidad láser

En el caso de este trabajo se fabricará un láser de estado sólido, continuo y de cavidad tipo lineal. Se eligió el cristal de Nd:YVO<sub>4</sub> porque es uno de los más eficientes en la fabricación de láseres de estado sólido bombeados por diodo. Comparado con el cristal de Nd:YAG que emite a la misma longitud de onda, el ortovanadato de Itrio dopado con Neodimio, posee baja dependencia en el control de temperatura y de longitud de onda del bombeo, es decir tiene un amplio ancho de banda de absorción, eficiencia-pendiente mayor y requiere menos potencia de bombeo para emitir luz (i.e. menor umbral de “laseo”).

Se ha encontrado que para el diseño de un láser es muy útil la técnica de análisis de propagación de haces por matrices ABCD (Svelto & Hanna, 2010). Esta técnica consiste en asignar una matriz característica de 4x4 elementos, a cada uno de los componentes ópticos que conforman el láser, y luego obtener la matriz que representa a todo el sistema óptico a partir del producto de éstas en orden inverso a su ubicación espacial en el sistema láser; de esta forma se puede analizar el comportamiento de la distribución espacial del haz o los haces involucrados cuando viajan a través del arreglo óptico. Esto asegura elegir una configuración de cavidad óptica que cumpla con las condiciones de estabilidad (Ec. 26) necesarias para que exista emisión láser.

Para el cálculo de una matriz ABCD se considera un rayo de luz que es transmitido y reflejado por un elemento óptico que se comporta de forma recíproca y que no depende de la polarización del rayo de luz, por ejemplo una lente o un espejo, como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12.** Convención de signos cuando un haz se propaga a través de un medio transparente.

Sea  $z$  el eje óptico de este elemento. Suponga que ese rayo está viajando aproximadamente a lo largo de la dirección  $z$  en un plano que contiene el eje óptico. El vector del rayo  $r_1$  a un plano de entrada dado,  $z = z_1$  del elemento óptico, puede caracterizarse por dos parámetros, su desplazamiento radial  $r(z_1)$  del eje  $z$  y su desplazamiento angular  $\theta_1$ . Igualmente, el vector del rayo  $r_2$  a un plano de salida dado  $z = z_2$  puede caracterizarse por su desplazamiento radial  $r_2(z_2)$  y desplazamiento angular  $\theta_2$ . El eje  $r$  se elige para que sea el mismo tanto para el rayo de entrada como para el rayo de salida y orientado como se muestra en la Figura 12. La convención de signos para los ángulos es que el ángulo es positivo si el vector  $r$  debe ser rotado en sentido de las manecillas del reloj para hacerlo coincidir con la dirección positiva del eje  $z$ . Así, por ejemplo,  $\theta_1$  es positivo mientras  $\theta_2$  es negativo. Dentro de la aproximación paraxial se asume que el desplazamiento angular  $\theta$  son suficientemente pequeños para hacer que  $\sin\theta \cong \tan\theta \cong \theta$ . En este caso las variables de salida  $(r_2, \theta_2)$ , y entrada  $(r_1, \theta_1)$ , están relacionadas por una transformación lineal. Si por lo tanto se define

$\theta_1 \cong \left(\frac{dr_1}{dz_1}\right)_{z_1} = r'_1$  y  $\theta_2 \cong \left(\frac{dr_2}{dz_2}\right)_{z_2} = r'_2$ , se puede escribir:

$$\begin{aligned} r_2 &= Ar_1 + Br'_1 \\ r'_2 &= Cr_1 + Dr'_1, \end{aligned} \tag{32}$$

donde  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  son constantes características de un determinado elemento óptico. En una formulación matricial es por lo tanto escribirla como,

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ r_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_1' \end{bmatrix}, \quad (33)$$

donde la matriz ABCD, caracteriza completamente el elemento óptico dado, dentro de la aproximación paraxial. Considere la propagación de un rayo en el espacio libre a lo largo de  $\Delta z = L$  de un material con índice de refracción  $n$ , por ejemplo un cristal. Si los planos de entrada y salida están alrededor del medio en un medio de índice de refracción cercano a la unidad (por ejemplo aire), se tiene entonces, utilizando la ley de Snell en su aproximación paraxial.

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 + Lr_1'/n \\ r_2' &= r_1'. \end{aligned} \quad (34)$$

Y la matriz ABCD correspondiente es por lo tanto,

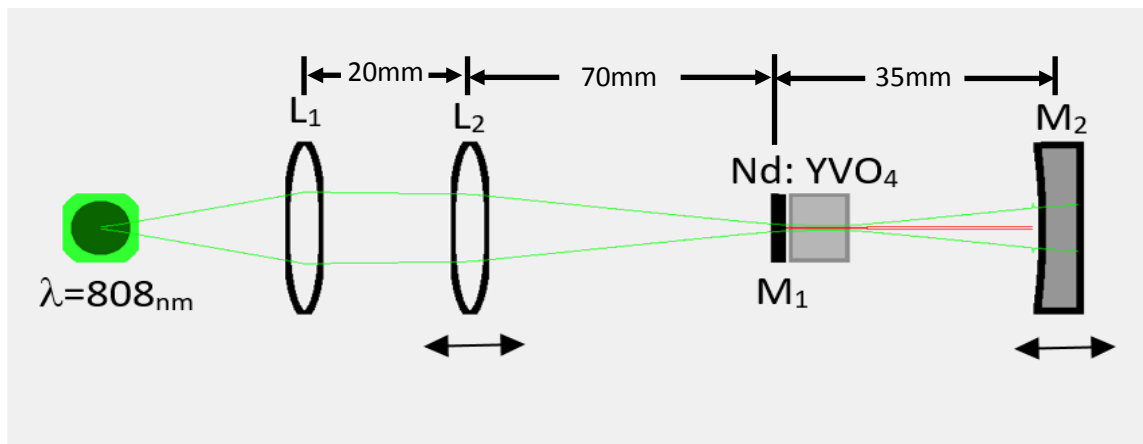
$$\begin{bmatrix} 1 & L/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Realizando un procedimiento similar se pueden encontrar la matriz característica para diferentes elementos ópticos. En la Tabla 1, se muestran las matrices características para los elementos más comunes (Svelto & Hanna, 2010).

**Tabla 1.** Presenta la matriz ABCD para los elementos ópticos más comunes en la fabricación de un láser.

Elemento	Matriz característica	Elemento	Matriz característica
Propagación en el espacio libre	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	Espejo esférico	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}$
Lente delgada	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$	Interfaz dieléctrica esférica	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2} \frac{1}{R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$

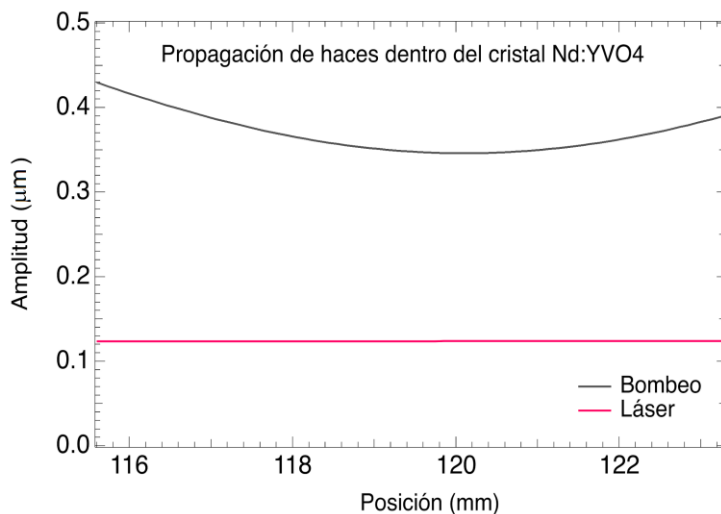
Para realizar el diseño de la cavidad láser se recomienda utilizar un software de simulación ya que la técnica de matrices ABCD puede resultar muy tediosa y por ende propiciar el cometer errores en las operaciones. Aunque existen varios softwares comerciales, para las necesidades de este trabajo se utilizó el software “Laser Simulator” desarrollado en el Laboratorio de Láseres y óptica No Lineal del CICESE que aunque se encuentra en desarrollo, resultó bastante útil. Este software simula la superficie de una mesa óptica donde se pueden colocar los componentes necesarios para el diseño del láser y además permite cambiar las propiedades de los componentes ópticos que se utilicen, como la distancia focal en caso de lentes delgadas, el radio de curvatura en caso de espejos cóncavos, el índice de refracción del medio activo, entre otras. En la Figura 13 se muestra el arreglo óptico utilizado para la simulación.



**Figura 13.** Simulación del láser. Simulación de la propagación de los haces de bombeo y de láser a través del arreglo óptico.

El objetivo de esta simulación fue determinar las distancias óptimas entre cada componente, para lograr que los anchos de los haces interactuando dentro del medio activo sean muy parecidos, así extraer la mayor potencia posible del haz de bombeo y convertirla en luz emitida mejorando así la eficiencia del láser. La simulación consistió en colocar un diodo láser de bombeo que emite a 808nm, con una  $M^2$  de fábrica superior a 200; luego se colocó una lente de 50mm de distancia focal ( $L_1$ ) para colimar el haz de bombeo, colimar se refiere a que el ancho de haz se mantiene constante a lo

largo de su propagación, enseguida se colocó una lente de distancia focal de 75mm ( $L_2$ ) para enfocar el haz dentro del cristal de Nd:YVO<sub>4</sub>. Se colocó un cristal que mide 4mm de ancho x 4 mm de alto x 8mm de largo, el cristal que se utilizará para la fabricación del láser tiene en una de sus caras una película altamente reflejante (>99%) a 1064nm que es la longitud de onda de la emisión láser por lo que funciona como espejo acoplador de entrada, por este motivo se colocó un espejo plano ( $M_1$ ) lo más cercano posible al cristal. Finalmente se colocó un espejo cóncavo de 50mm de radio de curvatura ( $M_2$ ) para que funcione como espejo acoplador de salida. En la Figura 13 se pueden observar dos haces dentro de la cavidad láser, el haz de color verde representa el haz de bombeo y el haz rojo representa la emisión láser. La simulación permite exportar los datos de propagación de haces a un archivo de texto, en este caso se utilizó el software Igor Pro para graficarlos como se muestra en la Figura 14, para llegar a estos resultados se varió la distancia entre los objetos varias veces hasta obtener los mejores resultados posibles.

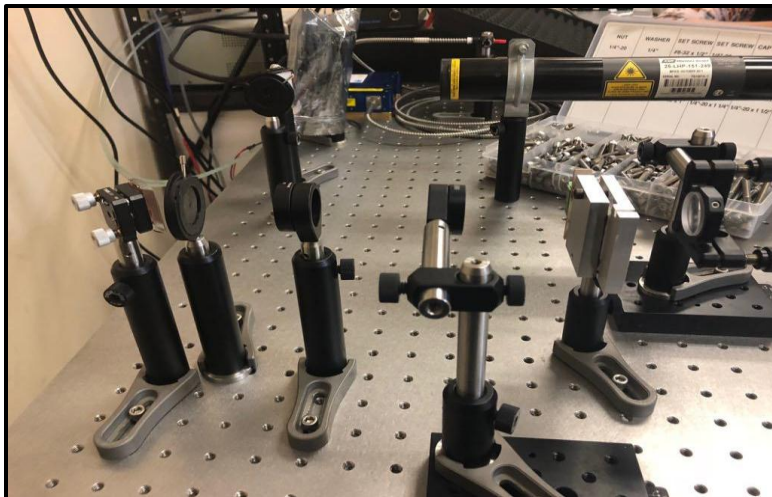


**Figura 14.** Propagación de haces. La figura muestra cómo se propagan las haces de bombeo y “laseo” dentro del cristal el cual tiene una longitud de 8mm.

En la Figura se observa que la parte más angosta del haz de bombeo (el foco) está casi en el centro del cristal y que existe una distancia de alrededor de 300nm entre el ancho de ambos haces lo cual se considera bastante aceptable para

obtener una buena eficiencia de conversión. Las distancias óptimas calculadas con esta simulación se muestran en la Figura 13.

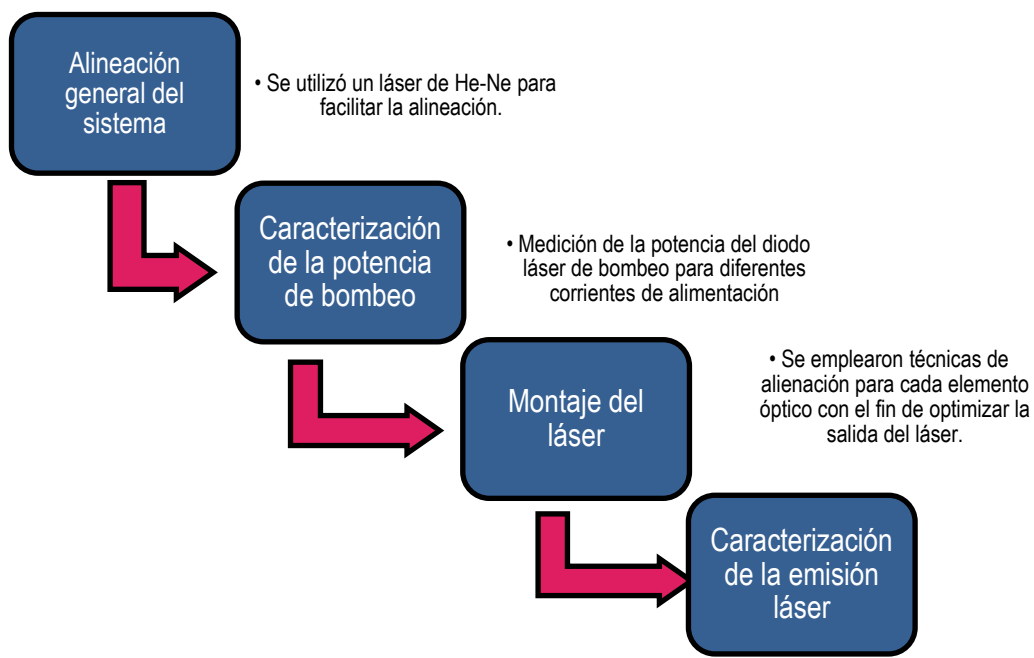
Una vez que se obtuvieron los resultados deseados en la simulación, se inició con la de fabricación del láser. Debido a sus propiedades físicas la luz que emite un láser, es peligrosa para la vista, ya que una simple reflexión puede causar ceguera por este motivo se tomaron medidas de seguridad como el evitar vestir joyería y el de utilizar lentes especiales que filtran en un intervalo de 700 a 1500nm. El láser de bombeo emite a 808nm por lo que al utilizar los lentes de protección es imposible verla; para facilitar la alineación de los elementos ópticos que formaron el arreglo láser se utilizó primero un láser de gas He-Ne, es un láser de muy baja potencia y visible ya que emite a 632.8nm. Se colocó en lugar del diodo de bombeo y utilizando técnicas geométricas, se logró que el haz láser pasara justo por el centro de cada elemento del arreglo, como se muestra en la Figura 15.



**Figura 15.** Muestra el arreglo utilizado para alinear los elementos del sistema láser.

La ventaja de utilizar el láser de He-Ne (tubo negro del fondo en la figura) es que tiene una  $M^2=1$ , por lo que mantiene un ancho de haz casi constante a distancias tan largas como de 1km es decir, no diverge rápidamente. Primero se hizo pasar el haz láser por dos espejos colocados a  $45^\circ$  respecto al ángulo de incidencia, de tal manera

que se tuviera un brazo de 90°, esto permitió controlar la trayectoria del haz para que pasara por un diafragma, con este diafragma se fija la altura del arreglo con respecto a la mesa óptica. Después del arreglo se colocó la lente colimadora y enseguida la lente enfocadora, cada vez que se colocaba un elemento óptico nuevo, era necesario asegurarse de que el haz pasaba justo por el centro, para esto se utilizaba una pequeña regla de papel y el diafragma previamente fijado. En la Figura 16 se muestra un diagrama de flujo que indica a grandes rasgos la metodología utilizada para fabricar el láser.



**Figura 16.** Muestra un diagrama a bloques de la metodología utilizada para la fabricación del láser.

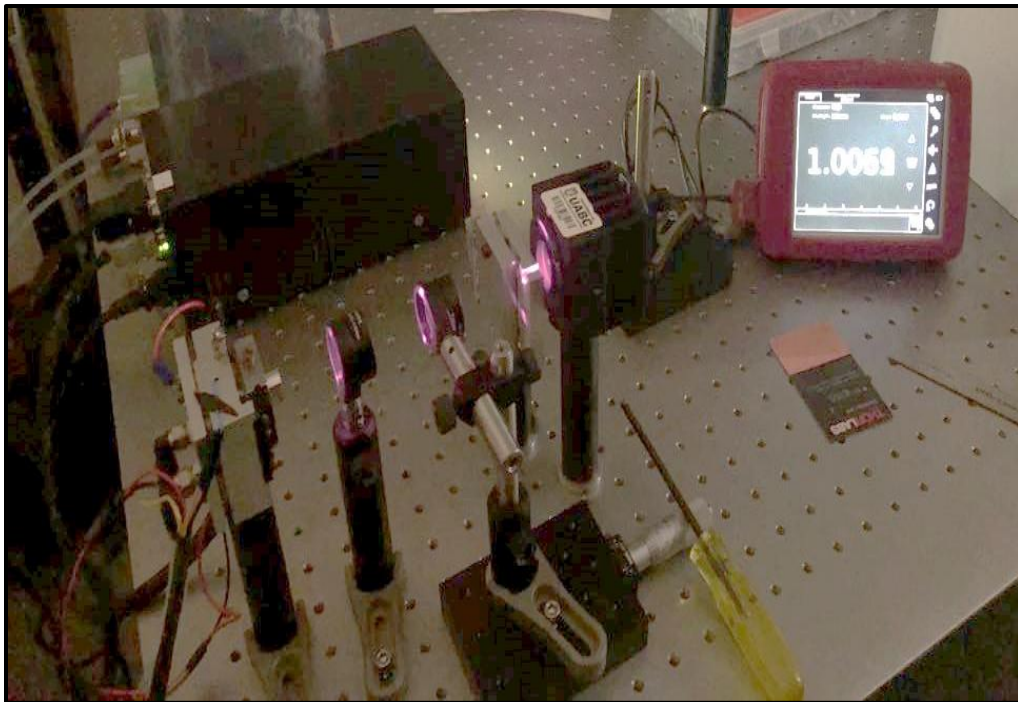
En la etapa de caracterización, se midieron la potencia de salida para determinar la eficiencia-pendiente del láser, los anchos de haz a diferentes distancias para determinar la calidad espacial del haz, y el espectro de longitudes de onda para determinar el ancho del haz. Los resultados se muestran en el capítulo 4.

## CAPÍTULO 4.

### Resultados

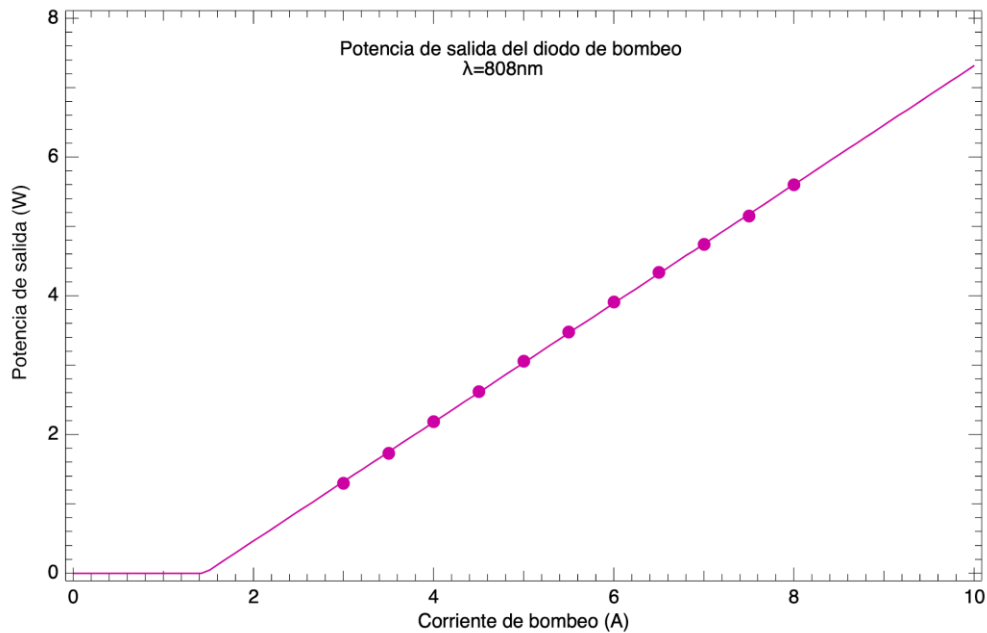
#### 4.1 Fabricación y caracterización del láser.

La fabricación del láser que aquí se presenta inició con la medición de la potencia de salida del láser de bombeo. Es muy importante determinar la potencia exacta que recibe el cristal de Nd:YVO<sub>4</sub> con el fin de después calcular la eficiencia del sistema láser. Para realizar esta medición se utilizó un medidor térmico de potencia óptica, modelo S310C de Thorlabs con un intervalo de detección de 100mW a 10W. Se colocó el medidor de potencia a la salida del diodo de bombeo y después de las lentes colimadora y enfocadora del arreglo, con el fin de despreciar las pérdidas por reflexiones en las lentes y obtener el valor real de potencia que recibe el cristal de Nd:YVO<sub>4</sub> como se muestra en la Figura 17.



**Figura 17.** Arreglo utilizado para medir la potencia de salida a diferentes corrientes de alimentación, se varió la corriente en saltos de 500mA y se midió la potencia de salida correspondiente.

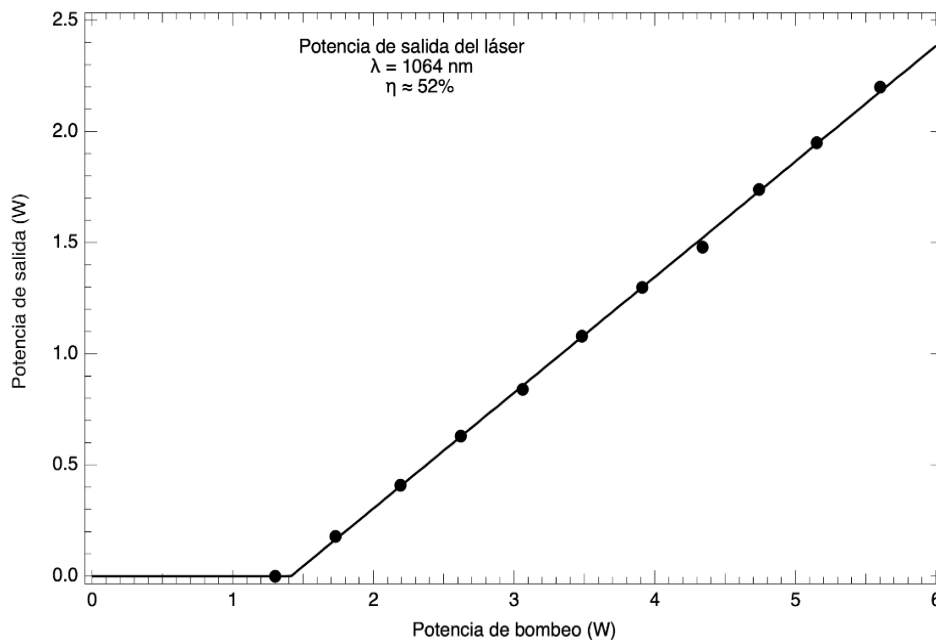
Para encender el diodo de bombeo se utilizó un controlador de diodos marca OSTECH. Este controlador proporciona hasta 20A en saltos de 100mA, cuenta con un controlador de celdas peltier para enfriamiento y permite monitorear la temperatura de un componente a través de un termistor de 10K $\Omega$ ; con este controlador se modificó la corriente suministrada al diodo de bombeo en intervalos de 500mA y se midió la potencia óptica que suministra el diodo, Los datos obtenidos se muestran en la Figura 18.



**Figura 18.** Potencia de salida del diodo de bombeo a diferentes valores de corriente suministrada por el controlador.

Después de medir la potencia de salida del diodo se montó el cristal y el espejo acoplador de salida con reflectancia de  $\sim 87\%$  a la longitud de onda de láser, 1064nm; y altamente transparente a la longitud de onda de bombeo, 808nm. Cabe mencionar que ambos elementos se colocaron en monturas de aluminio especiales que permiten modificar la altura y posición horizontal del haz que viaja dentro de la cavidad. Además el espejo acoplador de salida se colocó sobre una platina deslizable horizontalmente (sobre el eje de propagación z) para lograr optimizar la longitud de la cavidad láser. Una vez que se obtuvo oscilación láser, después de trabajar en la alineación de los

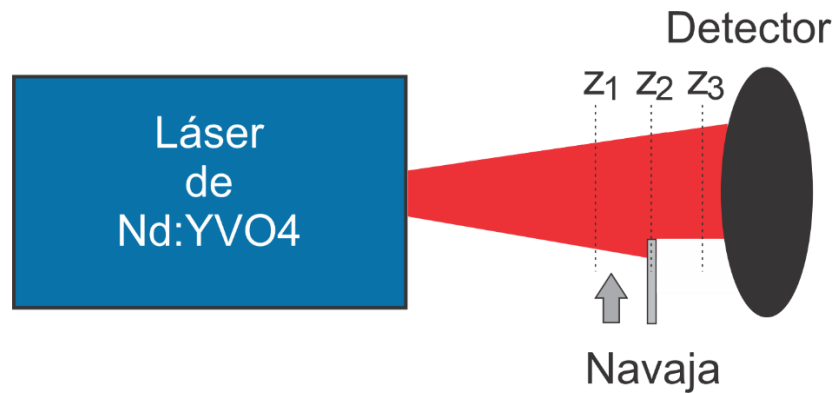
elementos, se colocó el mismo medidor de potencia a la salida del espejo acoplador para seguir trabajando en la alineación y mejorar la eficiencia de salida del láser. La Figura 19 muestra la potencia de salida del láser fabricado, se logró obtener una eficiencia pendiente de 52% la cual se considera bastante aceptable. Cabe mencionar que la potencia máxima de salida mostrada en la gráfica es de 2.5W pero esto es debido a que no se suministró el máximo de corriente posible al diodo, es decir, el diodo de bombeo puede aceptar hasta 12A, sin embargo, con el fin de evitar el calentamiento de éste, se optó por suministrar un máximo 8A que equivale a 5.8W de acuerdo a la Figura 18.



**Figura 19.** Potencia de salida del láser de  $\text{Nd:YVO}_4$ , se obtuvo una eficiencia pendiente de 52%, es decir más de 2.5W a una longitud de onda de 1064nm.

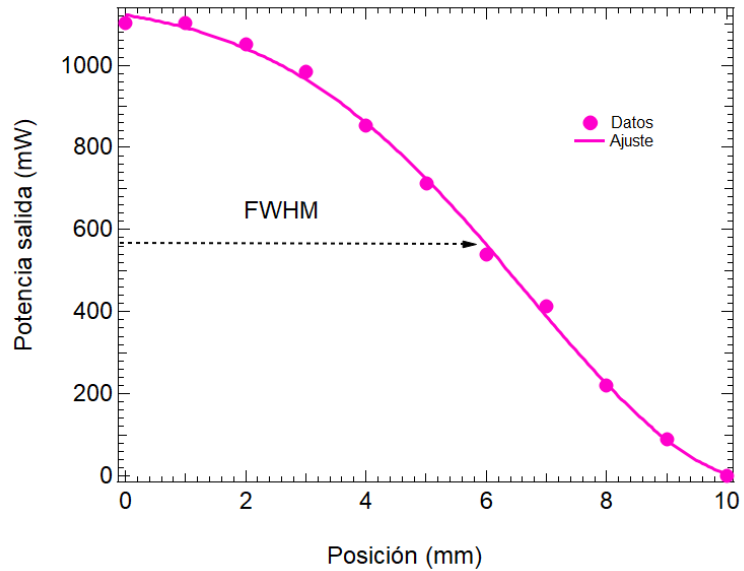
Los datos de potencia de salida obtenidos se ajustaron a la ecuación de la eficiencia-pendiente (Ec. 27) utilizando la técnica de mínimos cuadrados en el software Igor Pro V.7 (Wavemetrics, 2019), los coeficientes a encontrar en este ajuste fueron, la Potencia umbral y la eficiencia pendiente.

Para medir la  $M^2$  del láser de bombeo se utilizó una técnica conocida como la técnica de la navaja (Marín, 2013) la cual consiste en obstruir con un objeto delgado la trayectoria del haz y medir la potencia de salida para diferentes posiciones de la navaja en un plano determinado, por ejemplo en el plano  $z_2$ , como se muestra en la Figura 20.



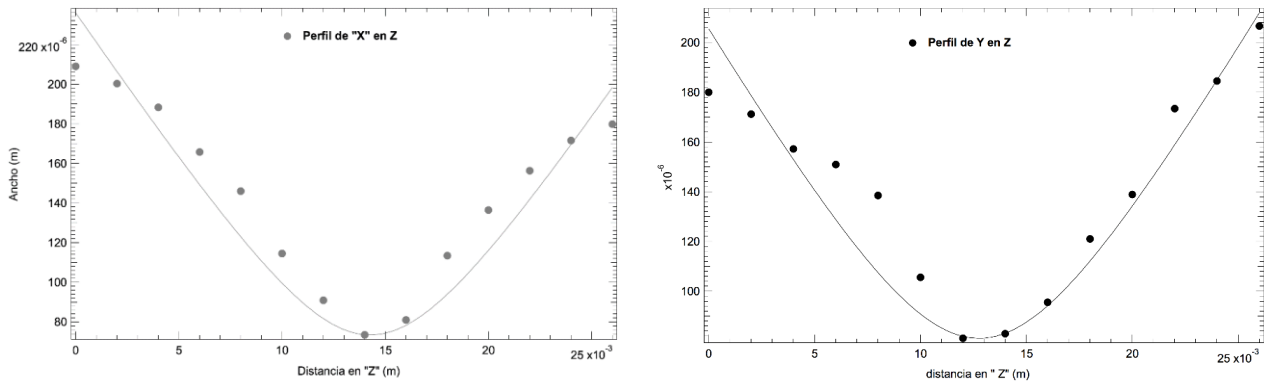
**Figura 20.** Arreglo óptico utilizado para medir la distribución de potencia en el perfil transversal del haz láser de salida. Se utilizó un medidor de potencia para medir la potencia de emisión a diferentes posiciones de la navaja.

La navaja se coloca sobre una montura deslizable a lo largo del eje  $z$  (eje de propagación del haz láser) que permite dar saltos del orden de  $100\mu\text{m}$ , los datos de potencia adquiridos se ajustan a una función gaussiana utilizando la técnica de mínimos cuadrados con el fin de obtener el ancho del haz (FWHM) para el plano bajo medición y para uno de los ejes transversales. En la Figura 21 se muestra un ejemplo de uno de los ajustes de ancho de haz realizado.



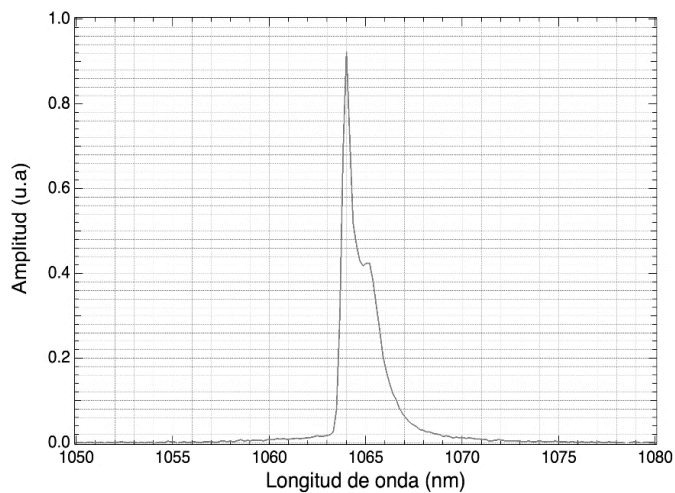
**Figura 21.** Muestra la serie de datos de potencia medidos en diferentes posiciones de la navaja para un solo plano y en el eje “x”.

Se ajustan los datos a una función gaussiana y se calcula el ancho FWHM del haz en ese plano, esta adquisición de datos se realiza varias veces para obtener el ancho de haz en diferentes planos de propagación en z, y para cada uno de los ejes transversales. Los anchos de haz se miden para planos equidistantes antes y después de la cintura del haz obtenida a través del uso de una lente de distancia focal de 50mm. Los anchos obtenidos se ajustaron a la ecuación 31, que muestra la dependencia del ancho del haz con respecto a la  $M^2$  del haz. El ajuste realizado se muestra en la Figura 22, éste permitió obtener la  $M^2$  del haz láser para los ejes “x” y “y”, obteniéndose una  $M^2=1.5$  para el eje “y” y  $M^2=1.8$  para el eje “x”.



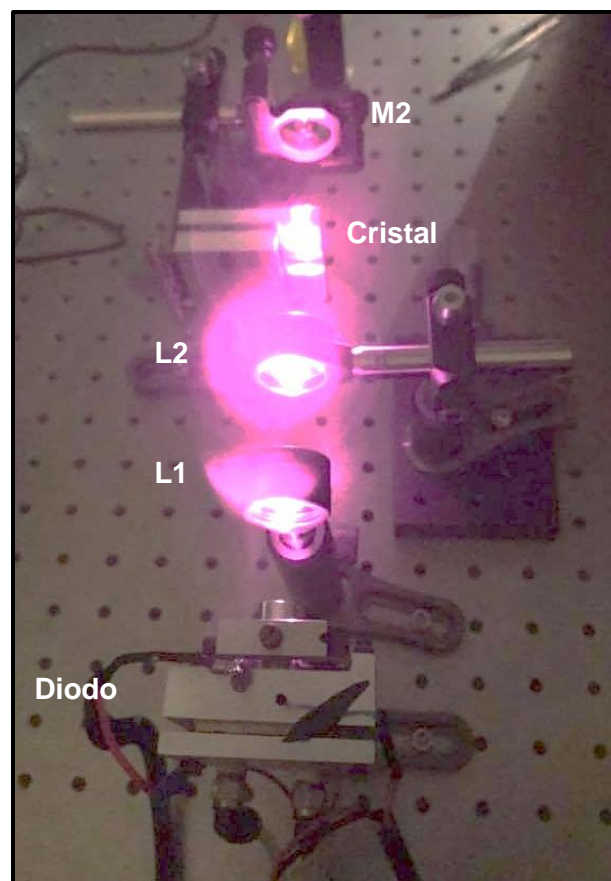
**Figura 22.** Ajuste de anchos de haz a la ecuación 31 para medir empíricamente la  $M^2$  del haz láser.

La  $M^2$  del haz no es ideal ya que presenta cierta elipticidad pero esto es comprensible dada la naturaleza de la calidad espacial del diodo de bombeo. La ventaja de tener un láser fabricado es que si se desea mejorar la calidad de la emisión, se pueden agregar elementos intracavidad en cualquier momento, por ejemplo un etalón. Para medir la longitud de onda de emisión se utilizó un espectrómetro de Thorlabs, modelo: CCS175 con resolución menor a 1nm. La figura 23 muestra el espectro de emisión del láser.



**Figura 23.** Muestra el espectro de emisión del láser de Nd:YVO4, la longitud de onda de emisión es de 1064nm.

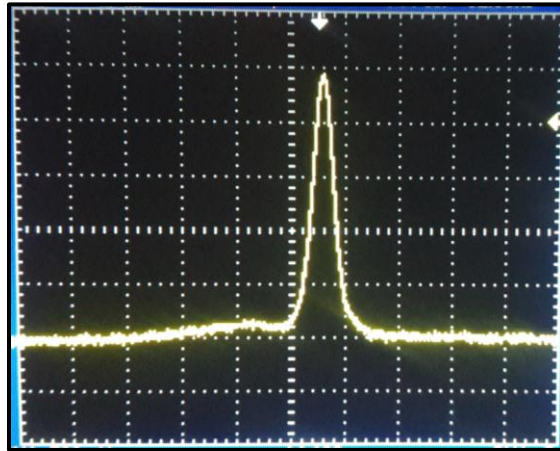
La Figura 24 muestra una fotografía desde arriba del láser fabricado, en la parte inferior se observa el diodo de bombeo emitiendo a 808nm, colocado sobre una montura de aluminio y es enfriado por agua y una celda peltier, enseguida se observa una lente colimadora L1, y enseguida una lente enfocadora L2, esta lente está montada sobre una platina deslizante con el fin de asegurar que el foco esté justo en el centro del cristal, en la siguiente montura metálica se encuentra el cristal de Nd:YVO4 y finalmente se encuentra el espejo acoplador de salida M2, este también está colocado sobre una montura deslizante que facilita su alineación.



**Figura 24.** Muestra el láser fabricado en el laboratorio de óptica, la luz reflejada que se observa corresponde al diodo de bombeo, que emite a una longitud de onda de 808nm.

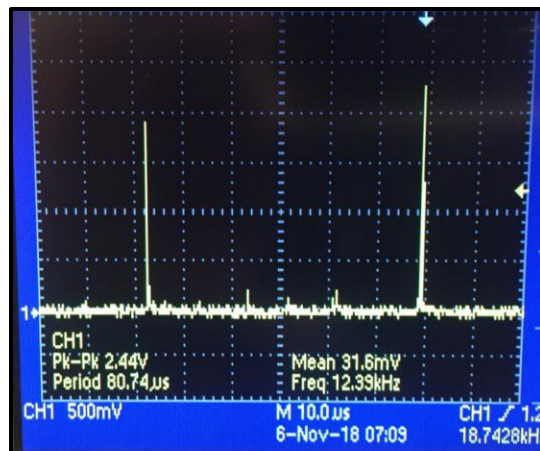
Finalmente con el fin de convertir el laser continuo a uno pulsado, se colocó un absorbedor saturable de Cr:YAG entre la cara de salida del cristal y el espejo acoplador

de salida, con este modulador, se obtuvieron pulsos de duración menor a 65ns como se muestra en la Figura 25.



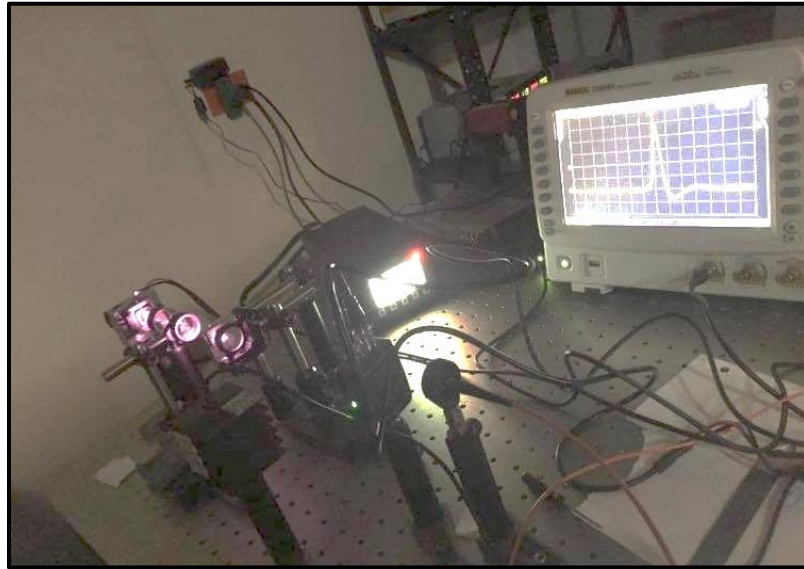
**Figura 25.** Imagen de osciloscopio que muestra la duración de uno de los pulsos, para adquirirlos se utilizó un fotodetector de silicio conectado a un osciloscopio, el osciloscopio tiene valor de 100ns/div.

La frecuencia de repetición de los pulsos es de 18kHz como se muestra en la Figura 26. Los datos de pulsos se obtuvieron utilizando un fotodetector de silicio conectado a un osciloscopio Tektronik de 100MHz de resolución.



**Figura 25.** Imagen de osciloscopio que muestra la frecuencia de repetición de los pulsos.

En la figura 26 se muestra el láser trabajando y emitiendo pulsos en ese momento se estaba utilizando un detector de Germanio que no es lo suficientemente rápido para detectar adecuadamente el ancho de los pulsos, debido a este motivo se observa una pequeña oscilación en la parte inferior derecha del pulso (imagen del osciloscopio al fondo), con este detector se obtenían pulsos con 500ns de duración, al cambiar de detector se obtuvieron los pulsos de 65ns mostrados en la Figura 24.



**Figura 26.** Sistema láser fabricado emitiendo en modo pulsado. En este caso se estaba utilizando un fotodetector lento por lo que el despliegue de los pulsos no era el adecuado.

## CAPÍTULO V.

### Conclusiones.

Se ha fabricado y optimizado un láser de estado sólido bombeado por diodo que tiene una eficiencia-pendiente de 52%, con una potencia de más de 2.5W de salida a una longitud de onda de 1064nm. Durante la fabricación de este dispositivo se tuvieron algunos problemas técnicos que requirieron del diseño y la fabricación de monturas especiales de aluminio para colocar el cristal Nd:YVO<sub>4</sub> y el cristal absorbedor saturable Cr:YAG.

Para construir el láser de Nd:YVO<sub>4</sub> fue necesario primero conocer varios parámetros, como las propiedades del cristal (e.g. sección eficaz, dimensiones e índice de refracción), fue necesario calcular empíricamente la reflectancia óptima del cristal acoplador de salida con el fin de obtener la mayor eficiencia de conversión posible. Suponiendo que no se tienen pérdidas en la cavidad, la eficiencia estaría limitada únicamente por la eficiencia cuántica, dada por,  $\eta = \frac{\lambda_b}{\lambda_s} = \frac{808nm}{1064nm} \times 100 = 76\%$ . Esto sería en un mundo ideal donde no existen pérdidas y el cristal absorbe cada fotón incidente y lo convierte a fotón de salida, y que además no tiene disipación de calor, por lo que se considera que el 52% es bastante aceptable.

El umbral de oscilación más bajo que logró obtenerse es de 1.3W lo que equivale suministrar alrededor de 2.3A al diodo de bombeo, podría ser más bajo pero se atribuye que sea así de alto debido a que el espejo acoplador de entrada, la película de la cara de entrada del cristal, se ha degradado por los años, la humedad y su exposición al medio ambiente, no se midió la reflectancia pero se considera que no es cercana al 100% por lo que agrega demasiadas pérdidas a la cavidad. Por otro lado, la M<sup>2</sup> del diodo de bombeo es de 150, por lo que diverge muy rápidamente complicando que sea colimado y enfocado, para una buena colimación se requiere de una lente de distancia focal más corta, es decir, entre más cerca se coloque del diodo, el ancho del

haz es más angosto, en el laboratorio la lente de distancia focal más corta es de 25mm, que está en el límite para colimar el haz y que no existan demasiadas pérdidas, en la Figura 24, se observa cómo la lente de colimación L1, es iluminada completamente por el bombeo, es decir, una parte de esta potencia es absorbida por la montura de la lente y no bombeada al cristal láser.

Para obtener los pulsos de 65ns se colocó un cristal de Cr:YAG dentro de la cavidad, en este caso de acuerdo a la teoría mostrada en el capítulo II, la duración de los pulsos podría acortarse o alargarse modificando la longitud de la cavidad y para esto se colocó el espejo acoplador de salida sobre una platina deslizante. Sin embargo hay que recordar que es una cavidad plano cóncava y que su longitud está limitada por el espejo acoplador de salida debido a la condición de estabilidad mostrada en la ecuación 26, es decir, no puede ser más grande de 50mm. El producir pulsos más cortos significa reducir la energía por pulso, dependerá de la aplicación para la que se vaya a utilizar si se acortan o no, la ventaja es que el láser es relativamente fácil de manipular y de adecuar a las diferentes necesidades.

La calidad espacial del haz es aceptable, se midió en 1.8 para el eje "x" y 1.5 para el eje "y", lo que significa que el haz presenta cierta elipticidad, es decir, diverge más en el eje "x", esto es entendible ya que por su fabricación el diodo de bombeo emite de forma elíptica, aunque se trató de corregir con las lentes, no se logró completamente.

Como trabajo a futuro se propone utilizar una cavidad confocal, formada por dos espejos esféricos con el fin de tener un mayor margen de longitud de cavidad y de mejorar la reflectancia del espejo acoplador de entrada.

## Referencias.

Baoquan, Y., Yi, T., Gang, L., Yuezhu, W., (2010). InGaAs/GaAs saturable absorber for diode-pumped passively Q-switched dual-wavelength Tm:YAP lasers. *Opt. Express*, 18 (5), 13574-13580.

Barlow, T. M., Bennett, R., & Beige, A. (2015). A master equation for a two-sided optical cavity. *Journal of Modern Optics*, 62(sup2), S11–S20.  
doi:10.1080/09500340.2014.992992

Bittencourt, M. A., Paranhos, L. R., & Martins-Filho, P. R. (2017). Low-level laser therapy for treatment of neurosensory disorders after orthognathic surgery: A systematic review of randomized clinical trials. *Medicina oral, patologia oral y cirugia bucal*, 22(6), 780–787. doi:10.4317/medoral.21968

Javan, A. (1958) Possibility of producing of negative temperature in gas discharges, *Phys. Rev. Lett.* 3 (2), 87-89.

Kane, T. & Byer R., (1985) Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG crystal laser, *Opt. Letters*, 10(2), 65-67.

Kogelnik, H., & Li, T. (1966) Laser Beams and Resonators, *Appl. Optics*, 5, (10), 1550-1567.

Lee, H.W., Kang, J.M.H., Teichman, J., Oh, & Welch, A.J., (2006) Urinary calculus fragmentation during Ho:YAG and Er:YAG lithotripsy, *Lasers Surg. Med*, 38,(1), 39-51.

Maiman, T.H., (1960) Stimulated optical radiation in ruby, *Nature*, 187, 493-494.

Marín, L.D., (2013) Estimación de incertidumbre en la medición del ángulo de divergencia de un láser gaussiano con base en la norma ISO/TR 11146-3:2004. *Ingeniería*, 23 (1), 43-59.

Omi, T., & Numano, K. (2014). The Role of the CO2 Laser and Fractional CO2 Laser in Dermatology. *Laser therapy*, 23(1), 49–60. doi:10.5978/isism.14-RE-01

Paschotta, R., (2008) Quantum efficiency, RP Photonics encyclopedia, recuperado el Mayo 15, 2019, web: [https://www.rp-photonics.com/quantum\\_efficiency.html](https://www.rp-photonics.com/quantum_efficiency.html).

Siegman, A. E., (1986) *Lasers*, Palo Alto, USA, Ed. Miller/Scheier Associates, Palo Alto, CA.

Sun, X., Cai, W., Alkhazragi, O., Ooi, He, E., Chaaban, A., Shen, C., Oubei, H., Khan, M., Ng, T., Alouini, M., & Ooi, B, (2018) 375-nm ultraviolet-laser based non-line-of-sight underwater optical communication, *Opt. Express* 26, 12870-12877.

Svelto O. & Hanna D. C., (2010). *Principles of lasers*, Milano, Italy, Ed. Springer.

Walsh, L.J., (2003), The current status of laser applications in dentistry, *Aust. Dent. J.* 48, (3), 146-155.