

TRABAJO PROFESIONAL

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ELECTRÓNICA

QUE PRESENTA:

DEYMA YASMÍN LÓPEZ MÉNDEZ

CON EL TEMA:

**“CONTROL DE ESTADOS EN UN LÁSER DE
ESTADO SÓLIDO POR MODULACIÓN DE
PARÁMETROS”**

MEDIANTE:

**OPCIÓN X
(MEMORIA DE RESIDENCIA PROFESIONAL)**



ÍNDICE GENERAL

	pág.
CAPITULO I: CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO Y DIMENSIONAMIENTO DEL PROBLEMA.	
1.1 Introducción.....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Justificación del proyecto.....	3
1.4 Objetivo general.....	4
1.5 Objetivos específicos.....	4
1.6 Caracterización del área en que se participó.....	4
1.6.1 Antecedentes del Centro de Investigaciones en Óptica.....	4
1.6.2 Localización del Centro de Investigaciones en Óptica.....	5
1.6.3 Misión.....	7
1.6.4 Visión.....	7
1.6.5 Direcciones de Investigación	7
1.6.6 Postgrados.....	8
1.6.7 Organigrama del CIO.....	9
1.7 Alcances y limitaciones.....	10
CAPITULO II:FUNDAMENTO TEÓRICO	
2.1 Conceptos básicos.....	12
2.1.1 Amplificación óptica.....	12
2.1.2 Absorción.....	14
2.1.3 Emisión espontánea.....	14
2.1.4 Emisión estimulada	15
2.1.5 Inversión de población.....	17
2.2 Elementos y características de un láser.....	18
2.2.1 Propiedades de los láseres.....	19



2.3 Operación básica del láser.....	22
2.4 Clasificación de seguridad en los láseres.....	24
2.5 Diodos láser para bombeo óptico de láseres de estado sólido.....	27
2.5.1 Diodos monomodo.....	28
2.5.2 Operación del diodo pulsado y onda continua (cw).....	29
2.5.3 Condiciones de fabricación del diodo.....	30
2.5.4 Matrices de diodo láser.....	30
2.5.5 Ventajas del bombeo por diodo.....	31
2.6 Resonadores.....	33
2.6.1 Estabilidad del resonador láser.....	34
2.7 Propiedades de los materiales para láseres de estado sólido	36
2.7.1 Láser de estado sólido de Nd: YVO ₄	36

CAPITULO III: DINÁMICA NO LINEAL Y CAOS EN LÁSERES

3.1 Sistemas lineales y no lineales.....	40
3.1.1 No linealidad y caos.....	42
3.2 Caos en láseres de estado sólido.....	42
3.2.1 Modulación externa.....	43

CAPITULO IV: METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO

4.1 Procedimiento experimental.....	47
4.2 Descripción de los dispositivos utilizados	50
4.3 Resultados.....	57
4.3.1 Umbral de la potencia de bombeo.....	57
4.3.2 Láser sin retroalimentación y modulación de parámetros.....	57
4.3.3 Modulación de parámetros de la dinámica del láser Nd: YVO ₄	59
4.3.5 Gráficas de la potencia del láser Nd: YVO ₄ a partir de la modulación de parámetros.....	66
CONCLUSIÓN	68



RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFIA	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Centro de Investigaciones en Óptica	5
Figura 1.2 Plano de las instalaciones del CIO.....	6
Figura 1.3 Organigrama del CIO.....	9
Figura 2.1 Absorción.....	14
Figura 2.2 Emisión espontánea.....	15
Figura 2.3 Emisión estimulada.....	17
Figura 2.4 Inversión de población.....	17
Figura 2.5 Elementos de un láser.....	18
Figura 2.6 Comparación de las longitudes de onda del rojo y el azul.....	20
Figura 2.7 Ondas de radiación óptica incoherente.....	20
Figura 2.8 Ondas de radiación óptica coherente.....	20
Figura 2.9 Fuente convencional de luz.....	21
Figura 2.10 Direccionalidad del haz láser y su ancho relativo.....	21
Figura 2.11 Operación básica de un láser.....	22
Figura 2.12 Diodos de heterounión.....	28
Figura 2.13 Espectro de absorción del Nd: YAG.....	33
Figura 2.14 Parámetros que intervienen en la estabilidad.....	34
Figura 2.15 Diagramas de estabilidad.....	35
Figura 2.16 Cristal láser Nd:YVO ₄	37
Figura 3.1 Resultados experimentales.....	44
Figura 4.1 Diagrama a bloques del experimento.....	47
Figura 4.2 Alineación del eje óptico de láser.....	48
Figura 4.3 Diagrama esquemático del experimento parte 1.....	49
Figura 4.4 Diagrama esquemático del experimento parte 2.....	49



Figura 4.5 Monturas para espejo.....	50
Figura 4.6 Laser de Helio-Neón.....	50
Figura 4.7 Diodo láser.....	51
Figura 4.8 Colimador óptico.....	51
Figura 4.9 Detector y filtros.....	52
Figura 4.10 Osciloscopio.....	53
Figura 4.11 Generador de funciones.....	53
Figura 4.12 Divisor de haz.....	53
Figura 4.13 Mesa holográfica.....	54
Figura 4.14 Gafas de seguridad láser.....	54
Figura 4.15 Filtro de densidad neutra variable.....	55
Figura 4.16 Medidor de potencia.....	55
Figura 4.17 Visor de infrarrojo.....	55
Figura 4.18 Transductor piezoeléctrico.....	56
Figura 4.19 Umbral de la potencia de bombeo.....	57
Figura 4.20 Láser sin modulación.....	58
Figura 4.21 Diagrama de bifurcación (1KHz- 60 KHz) a 1.95 A.....	60
Figura 4.22 Diagrama de bifurcación (1KHz- 100 KHz) a 1.95 A.....	60
Figura 4.23 Modulación potencia de bombeo 1.45 A.-1.95 A. a 10 KHz.....	61
Figura 4.24 Modulación de potencia de bombeo 1.45 Amperes.-1.95 Amperes a 17 KHz	62
Figura 4.25 Figura 4.24 Modulación de la atenuación del filtro.....	63
Figura 4.26 Modulación del voltaje en el piezoeléctrico.....	64



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Descripción de los edificios del CIO.....	5
Tabla 2.2 Clasificación de los láseres en base a su potencia de salida.....	26
Tabla 2.3. Características básicas.....	37
Tabla 2.4. Propiedades ópticas.....	38
Tabla 4.1 Potencia de salida del láser.....	58

CAPITULO I

**CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO Y DIMENSIONAMIENTO DEL
PROBLEMA.**



1.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la dinámica del láser de estado sólido Nd: YVO₄ (Ortovanadato de Itrio dopado con Neodimio) sujeto a la modulación de parámetros, para nuestro experimento utilizamos un transductor piezoeléctrico como retroalimentación al sistema para estudiarlo modulamos la frecuencia para ver en qué frecuencias se producía dinámica caótica, así mismo modulamos la potencia de bombeo.

¿Por qué algunos láseres producen ruido como los picos de intensidad? Esta pregunta tiene a los científicos motivados en las últimas cuatro décadas para descubrir las fuentes de inestabilidad en sistemas ópticos no lineales. Recientemente la dinámica caótica en sistemas láser ha sido considerada con interés debido a sus aplicaciones potenciales en el área de telecomunicaciones ya que el caos óptico puede ser utilizado para enviar mensajes codificados.

La organización de este trabajo está dividida en cuatro capítulos:

En el capítulo I se presenta los objetivos del proyecto, la justificación del mismo, el área en donde se realizó el experimento y los alcances y limitaciones del proyecto.

En el capítulo II se describen las bases teóricas del funcionamiento de un láser, las propiedades de los materiales para láseres de estado sólido, así mismo las características del cristal Nd: YVO₄ que será utilizado en el experimento y las ventajas de emplear un diodo láser como fuente de bombeo óptico y el capítulo III se presenta teoría sobre la dinámica no lineal y el caos en láseres.

Por último en el capítulo IV se describe la metodología utilizada en nuestro experimento, eligiendo como medio activo al cristal Nd: YVO₄ ya que responde en absorción a una longitud de onda de 808 nm que es la longitud de onda con la que trabaja el diodo láser, significa que la mayor parte de los fotones proporcionados por el diodo láser serán absorbidos por el medio activo logrando una inversión de población suficiente y liberando más fotones para tener una ganancia alta en la salida, así mismo se presentan los resultados obtenidos en el experimento.



1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Después de la demostración del primer láser de estado sólido de rubí demostrada por Theodore Maiman en 1960, un extraordinario número de diferentes tipos de láseres se han inventado haciendo uso de una amplia variedad de medios activos y técnicas de bombeo. Actualmente los láseres de estado sólido son la fuente más importante de luz láser ampliamente explorado en la industria y la tecnología, estos láseres son altamente eficientes y robustos y se puede trabajar en diversos entornos industriales. [1]

Hoy en día hay un interés considerable en el comportamiento inestable de los sistemas ópticos, en particular de los láseres de estado sólido que describen una clase de láseres en la que los iones activos en materiales huésped de cristal o vidrio son bombeados ópticamente para crear una inversión de población. Este comportamiento inestable corresponde con frecuencia a la dinámica espacio-temporal bien estructurados en forma de comportamiento periódico o caótico. La naturaleza no lineal del sistema laser exhibe una gama de comportamientos que van desde emisión continua, pulsada periódicamente o bien caos y combinaciones de estos estados. Una de las técnicas para crear estados caóticos y ver la dinámica del láser es la modulación de un parámetro el cual será usado en este experimento. [2]

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

Los láseres de estado sólido son una fuente de luz intensa y compacta que se usa en un gran número de dispositivos hoy día, de la estabilidad de la emisión de estos láseres depende el funcionamiento un buen número de procesos industriales y de telecomunicaciones por lo que el estudio de la dinámica de estos láseres es importante. Uno de los problemas de este tipo de láseres es su tendencia a mostrar inestabilidad cuando se presentan ciertos tipos de perturbaciones por lo que en este trabajo se estudian técnicas que permitan controlar las inestabilidades de estos láseres para contribuir en su entendimiento y en el mejoramiento de las tecnologías de aplicaciones de estos láseres.



1.4 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio experimental del comportamiento de la dinámica de un sistema láser de estado sólido Nd: YVO₄ con retroalimentación aplicando métodos de modulación de parámetros con el propósito de controlar las condiciones en las cuales el sistema produzca distintos regímenes de funcionamiento como la dinámica o generación de caos.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la dinámica de un láser de estado sólido sujeto a modulación de parámetros.
- Caracterizar la potencia, características temporales en distintos regímenes de funcionamiento y distintos niveles de modulación.

1.6 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EN QUE SE PARTICIPÓ. [2]

1.6.1 Antecedentes del Centro de Investigaciones en Óptica.

Acorde con el objetivo que el CONACYT estableció desde sus inicios, de fomentar una cultura competitiva basada en el desarrollo científico y tecnológico, enmarcando sus acciones en las políticas y objetivos del Plan Indicativo de Ciencia y Tecnología 1976-1982, el consejo tuteló la fundación del Centro de Investigaciones en Óptica, Asociación Civil, (CIO), en la ciudad de León Guanajuato.

Así, en abril de 1980 el CIO se funda en León e inicia labores en un piso rentado de un edificio del primer cuadro de la ciudad con un 1 investigador y 3 técnicos (el propio Dr. Malacara, el entonces M.C. Arquímedes Morales Romero y los Ingenieros José Castro Villicaña y Carlos Javier Martínez Castro, comisionados todos por la UNAM), desarrollando investigación en el área de la instrumentación óptica, fundamentalmente en el área de telescopios astronómicos y superficies ópticas. Se dieron también los primeros pasos para hacer crecer el número de su personal y las áreas de trabajo, lo que es más importante, se inició la divulgación de temas científicos y de la óptica en las instituciones educativas de nivel medio y

superior que existían en esa época, impartiendo cursos en diferentes carreras y dirigiendo tesis con temáticas científicas, tanto en instituciones de la ciudad como en la región central del país.

Actualmente el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. se define como Centro Público de Investigación, con la misión de llevar a cabo investigación básica y aplicada en óptica, la formación de recursos humanos de alto nivel en el este mismo campo del conocimiento, así como al fomento de la cultura científica en la sociedad, con la misión además de ser un Centro de Investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología en nuestro país.

1.6.2 Localización del Centro de Investigaciones en Óptica.

La figura 2.1 que se presenta posteriormente indica la ubicación del Centro de Investigaciones en Óptica.

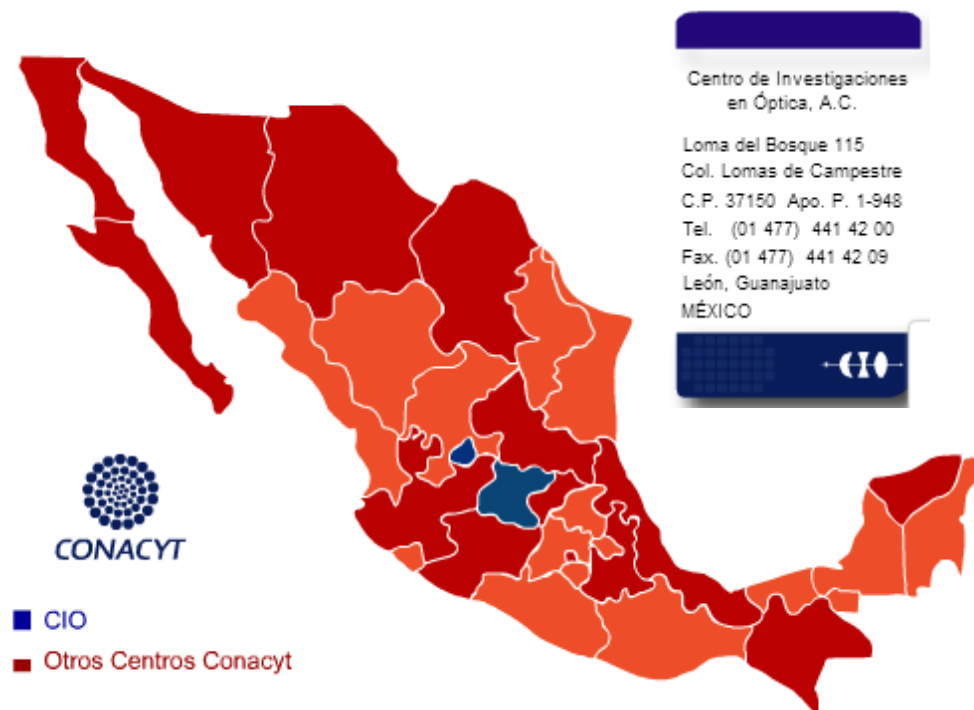


Figura 1.1.- Centro de Investigaciones en Óptica A.C

Este plano muestra las áreas que se localizan dentro del CIO representado por el boceto de la figura 1.2.



Figura 1.2.- Plano de las instalaciones del CIO.

En la siguiente tabla se indica la descripción de cada edificio del CIO.

Tabla 1.1. Descripción de los edificios del CIO

Edificio	Descripción
A	Oficinas de dirección administrativa y servicios generales
B	Cubículos para alumnos de postgrado.
C	Taller mecánico y de optomecatrónica.
D	Sala de videoconferencias
E	Laboratorio de láseres
F	Oficinas del edificio F (Octágono) y laboratorios.
G	Dirección general



1.6.3 Misión

El Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. es un centro público cuyo propósito es desarrollar investigación básica y aplicada en el campo de la óptica, que contribuya a los esfuerzos de la comunidad científica para impulsar las fronteras del conocimiento y su aplicación en el sector productivo y social del país, además de la formación de recursos humanos de alto nivel, el desarrollo y la transferencia de tecnología, y la contribución de una cultura científica y tecnológica en la sociedad mexicana.

Con base en la Misión, son objetivos estratégicos del Centro:

- Contribuir al conocimiento científico, a través de la investigación teórica y experimental en óptica y disciplinas afines,
- Fortalecer la capacidad científica y tecnológica del país, a través de programas de especialidad y postgrados de calidad internacional,
- Contribuir al crecimiento tecnológico del país, a través del desarrollo y la transferencia de tecnología, y
- Contribuir al desarrollo de una cultura científica y tecnológica en la sociedad mexicana, a través de la divulgación y difusión del conocimiento científico.

1.6.4 Visión

Ser un Centro de investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología de nuestro país.

1.6.5 Direcciones de investigación

La dirección de investigación se encarga de dirigir, coordinar y promover programas y proyectos de investigación del Centro, estableciendo la normatividad necesaria para una adecuada contratación, capacitación y estímulos de los investigadores, así como promover la participación del personal del área en las labores de formación académica y captación de proyectos con el sector productivo, supervisando y coordinando los resultados y vigilando que las divisiones de investigación y laboratorios que las conforman cuenten con los insumos, mobiliario y equipo que



requieran, dentro de los lineamientos gubernamentales, fiscales y del Centro, para cumplir, oportuna y eficientemente con sus objetivos y asegurar la contribución del Centro al desarrollo de la ciencia . A si mismo las áreas de investigación se dividen en dos partes.

- **División Óptica :**

La División Óptica trabaja en coordinación con la Dirección de Investigación, y esta a su vez con las otras Direcciones de Área, para fortalecer las líneas de investigación existentes, proponer mecanismos para estimular la productividad científica-académica-tecnológica y de innovación entre los investigadores de su división, ayudar en la solución de problemas que pudieran surgir en los grupos de investigación existentes, así como promover nuevas líneas que conlleven a proyectos de investigación con mayor impacto social-económico- científico-académico.

- **División Fotónica:**

La División Fotónica trabaja en coordinación con la Dirección de Investigación, y esta a su vez con las otras Direcciones de Área, para fortalecer las líneas de investigación existentes, proponer mecanismos para estimular la productividad científica-académica-tecnológica y de innovación entre los investigadores de su División, ayudar en la solución de problemas que pudieran surgir en los grupos de investigación existentes, así como promover nuevas líneas que conlleven a proyectos de investigación con mayor impacto social-económico- científico-académico.

1.6.6 Postgrados

Maestría en Ciencias Óptica. La Maestría en Ciencias Óptica tiene como objetivo generar recursos humanos que posean, como resultado de su formación, amplios conocimientos teóricos y prácticos en el campo de la óptica. Igualmente tiene por objetivo desarrollar habilidades metodológicas básicas de divulgación, innovación tecnológica e investigación.

Maestría en Optomecatrónica. Generación de recursos humanos a nivel maestría con conocimientos teóricos y prácticos capaces de desarrollar sistemas opto-

mecánicos, opto-electrónicos, opto-computacionales y/o opto-mecatrónicos que tengan un impacto tecnológico en la industria regional y nacional.

Doctorado en Ciencias Óptica. El Doctorado en Ciencias (Óptica) tiene como objetivo generar recursos humanos que participen en el desarrollo de la ciencia y la tecnología en los campos de la óptica como investigadores del más alto nivel y calidad en su área de competencia, con la misión de generar nuevos conocimientos y colaborar en el avance de la ciencia básica y aplicada.

1.6.7 Organigrama del C.I.O

El Centro de Investigaciones en Óptica se compone por:

- Dirección general
- Dirección de formación académica
- Dirección de investigación
- Dirección de tecnología e información
- Dirección administrativa



Figura 1.3 Organigrama del CIO



1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCES

El experimento se realizó con un sistema láser de estado sólido Nd: YVO₄ (Ortovanadato de Itrio dopado con Neodimio) de potencia baja el cual está en el laboratorio, sin embargo se pueden realizar las diferentes técnicas de caracterización empleadas en el experimento en sistemas láser de mayor potencia.

LIMITACIONES

- El experimento solo se realizó con láseres de potencia baja del laboratorio.
- Hubieron pequeños fallos con el funcionamiento del detector del haz láser generando ruido en la señal visualizada en el osciloscopio.
- Solo se hicieron pruebas con el elemento de ganancia (medio activo) Nd: YVO₄.
- Falta de equipo necesario para ser más eficiente el experimento.



CAPITULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO



CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS LÁSERES

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS [3]

Los láseres son dispositivos que generan radiación óptica coherente. La palabra "LÁSER" (siglas en inglés que significa "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation") es el acrónimo de Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación. El primer dispositivo láser fue de estado sólido de rubí demostrado por Theodore Maiman en 1960. En el mismo año se hicieron el primer láser de gas de Helio-Neón y el primer diodo láser. Antes de este trabajo experimental, Arthur Schawlow, Charles Hard Townes, Nikolay Basov y Alexander Prokhorov habían publicado un innovador trabajo teórico sobre los principios de funcionamiento de los láseres, un amplificador de microondas y el oscilador habían sido elaboradas por el grupo Townes en 1953. El término "MASER" (siglas en inglés que significa Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es el acrónimo de "Amplificación de Microondas por Amplificación Estimulada de Radiación" se utilizó al principio, pero más tarde fue reemplazado por el láser. [4]

Para entender el funcionamiento de un láser tenemos que conocer algunos de los principios que rigen la interacción de la radiación con la materia. Algunos principios básicos importantes de un láser; para su operación es necesario entender amplificación óptica, absorción, emisión espontánea, emisión estimulada e inversión de población.

2.1.1 Amplificación óptica

Sistemas moleculares constituidos por átomos e iones sólo pueden existir en estados de energía discreta. Un cambio de un estado de energía a otro, es llamado una transición y se asocia, ya sea con la emisión o la absorción de un fotón. La longitud de onda de la radiación absorbida o emitida viene dada por la relación de frecuencia de Bohr.

$$E_2 - E_1 = hv_{21} \quad \text{ecuación 2.1}$$

Donde E_2 y E_1 son dos niveles discretos de energía, v_{21} es la frecuencia, y h es la constante de Planck. Un láser puede ser considerado como un conjunto de muchos sistemas atómicos idénticos. En el equilibrio térmico, los estados de energía más



bajos en el medio están más densamente pobladas de los estados de energía más altos. Al interactuar una onda con el sistema láser aumentará los electrones de menor nivel a niveles de energía más altos y por lo tanto experimentar absorción.

El funcionamiento de un láser requiere que el equilibrio de la energía de un material sea cambiado de tal manera que más átomos con sus electrones estén en un nivel de energía superior y no en el estado basal generando inversión de población, esto se logra mediante una fuente de bombeo externa que suministra la energía necesaria para la transferencia de electrones a partir de un nivel de energía inferior a otro superior, la energía de la fuente de bombeo es lo que provoca una "inversión de población". Una onda electromagnética de frecuencia adecuada, incide sobre el material láser "invertida", se amplifica porque los fotones incidentes hacen que los electrones en el nivel más alto decaigan a un nivel inferior y por lo tanto emitan fotones adicionales. Como resultado, la energía se extrae del sistema atómico y se suministra al campo de radiación. La liberación de la energía almacenada por la interacción con una onda electromagnética se basa en la emisión estimulada o inducida.

Dicho brevemente, cuando un material se excita de tal manera como para proporcionar más electrones en un nivel de energía más alto que en algún nivel inferior, el material será capaz de amplificar la radiación a la frecuencia correspondiente a la diferencia de nivel de energía. [5]

Coeficientes de Einstein

Podemos introducir más convenientemente el concepto de coeficientes A y B de Einstein siguiendo la derivación original de Einstein. Para simplificar la discusión, Consideremos un material ideal con sólo dos niveles de energías no degeneradas, niveles 1 y 2, que tiene poblaciones de N_1 y N_2 , respectivamente. El número total de los electrones en estos dos niveles se asumen constantes.

$$N_1 + N_2 = N_{Tot} \quad \text{ecuación 2.2}$$

Transferencia radiativa entre los dos niveles de energía, que se diferencian por $E_2 - E_1 = h\nu_{21}$, está permitido. El átomo puede transferir electrones de un estado E_2 al estado inferior E_1 emitiendo energía, por el contrario, la transición de un estado E_1

a E_2 es posible mediante *la absorción de energía*. La energía eliminado o añadido al electrón aparece como un cuanto de $h\nu_{21}$. Podemos identificar tres tipos de interacción entre la radiación electromagnética y un simple sistema de electrones de dos niveles. [6]

2.1.2 Absorción

Si una onda electromagnética cuasi-monocromática de frecuencia ν_{21} pasa a través de un sistema atómico con la diferencia de energía $h\nu_{21}$, entonces la población del nivel inferior se vaciará a una velocidad proporcional tanto a la densidad de radiación $\rho(\nu)$ y para la población N_1 de ese nivel:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -B_{12}\rho(\nu)N_1, \quad \text{ecuación 2.3}$$

Donde B_{12} es una constante de proporcionalidad con dimensiones $\text{cm}^3/\text{s}^2 \text{ J}$.

El producto $B_{12}\rho(\nu)$ puede ser interpretado como la probabilidad por unidad de frecuencia que las transiciones son inducidas por el efecto del campo.

La figura 2.1 ilustra este proceso que ocurre dentro de un láser. Aquí un fotón incide sobre un electrón en el estado E_1 y es absorbido por ese átomo, el fotón cesa de existir y su energía aparece como energía incrementada en el electrón, el cual se mueve al nivel E_2 . [7]

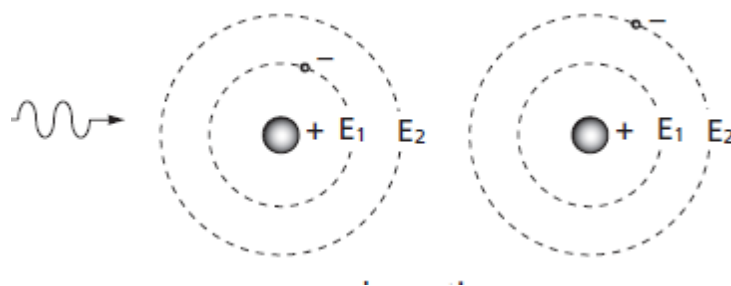


Figura 2.1 Absorción

2.1.3 Emisión espontánea

Después de que un electrón se ha elevado al nivel superior por absorción, la población del nivel superior 2 decae espontáneamente al nivel más bajo 1 a una velocidad proporcional a la población de nivel superior.

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -A_{21}N_2 \quad \text{ecuación 2.4}$$

Donde A_{21} es una constante de proporcionalidad con dimensión s^{-1} . la cantidad A_{21} , siendo una característica del par de los niveles de energía en cuestión, que se llama la probabilidad de transición espontánea debido a este coeficiente da la probabilidad de que un electrón en el nivel 2 de forma espontánea cambie al nivel 1 dentro de una unidad de tiempo, ver figura 2.2.

La emisión espontánea es una función estadística del espacio y del tiempo. Con una gran número de electrones que emiten de forma espontánea no hay una relación de fase entre los procesos de emisión individuales, los cuantos emitidos son incoherentes. La emisión espontánea se caracteriza por el tiempo de vida del electrón en el estado excitado, después de que espontáneamente volver al estado inferior e irradia la energía. Esto puede ocurrir sin la presencia de un campo electromagnético.

Una solución $N_2(t) = N_2(0) \exp\left(\frac{-t}{\tau_{21}}\right)$ ecuación 2.5

Donde τ_{21} es el tiempo de vida para la radiación espontanea del nivel 2. este tiempo de vida es igual al recíproco del coeficiente de Einstein,

$$\tau_{21} = A_{21}^{-1} \quad \text{ecuacion 2.6}$$

En general, el recíproco de la probabilidad de transición de un proceso es llamado su tiempo de vida.

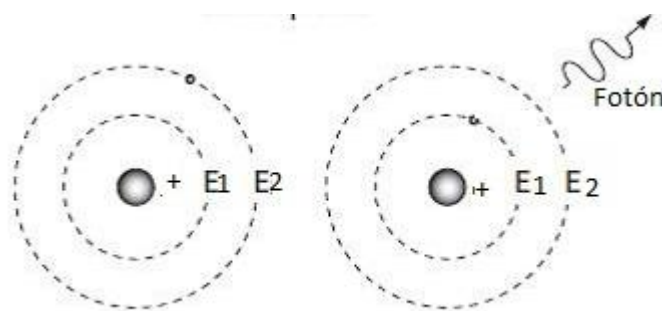


Figura 2.2.- Emisión espontánea

2.1.4 Emisión estimulada

La emisión no sólo tiene lugar de forma espontánea, también bajo la estimulación por la radiación electromagnética de la frecuencia apropiada. En este caso, el



electrón cede un cuanto al campo de radiación por " emisión inducida o estimulada " ver figura 2.3, según:

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -B_{21}\rho(\nu)N_2 \quad \text{ecuación 2.7}$$

Donde B_{21} de nuevo es una constante de proporcionalidad.

La radiación emitida a partir de un sistema atómico en la presencia de radiación externa se compone de dos partes. Esa parte cuya intensidad es proporcional a A_{21} es la radiación espontánea; su fase es independiente de la radiación externa. La parte cuya intensidad es proporcional a $\rho(\nu)B_{21}$ es la radiación estimulada; su fase es la misma que la de la radiación estimulante externa. La probabilidad de transición inducida es proporcional a la densidad de la de la energía de la radiación externa en contraste a la emisión espontánea.

La radiación cuántica que es emitida al campo por la emisión inducida es coherente con ella. El parámetro útil para la acción del láser es el coeficiente de B_{21} ; el coeficiente A_{21} representa un término de pérdida y la introduce en los fotones del sistema que no son de fase relacionada con el incidente flujo de fotones del campo eléctrico. Por lo tanto el proceso espontáneo representa una fuente de ruido en un láser.

Si combinamos la absorción, emisión estimulada y espontánea, como se expresa por: (2.3), (2.4) y (2.7) podemos escribir, para el cambio de nivel superior e inferior de poblaciones en nuestro modelo de dos niveles,

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -\frac{\partial N_2}{\partial t} = B_{21}\rho(\nu)N_2 - B_{12}\rho(\nu)N_1 + A_{21}N_2 \quad \text{ecuacion 2.8}$$

La relación $\frac{\partial N_1}{\partial t} = -\frac{\partial N_2}{\partial t}$ ecuacion 2.9

A partir de la ecuación 2.2. En el equilibrio térmico, el número de transiciones por unidad de tiempo de E_1 a E_2 debe ser igual al número de transiciones de E_2 a E_1 . Ciertamente, en equilibrio térmico.

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \frac{\partial N_2}{\partial t} = 0 \quad \text{ecuación 2.10}$$

Por lo tanto podemos escribir:

$$N_2 A_{21} + N_2 \rho(\nu) B_{21} = N_1 \rho(\nu) B_{12} \quad \text{ec. 2.11}$$

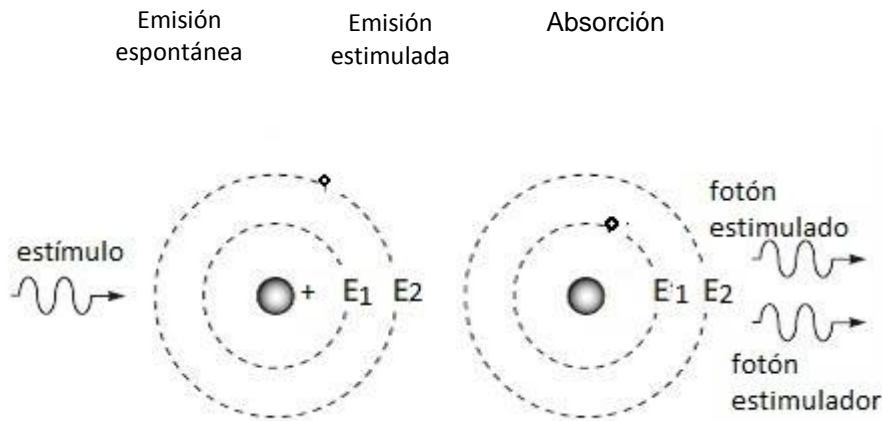


Figura 2.3.- Emisión estimulada

2.1.5 Inversión de población

La condición esencial para la amplificación es que hay más electrones en un nivel de energía superior que en un nivel de energía más bajo, es decir, para la amplificación, como se ilustra en la figura 2.4.

$$N_2 > N_1 \quad \text{si} \quad E_2 > E_1 \quad \text{ecuación 2.12}$$

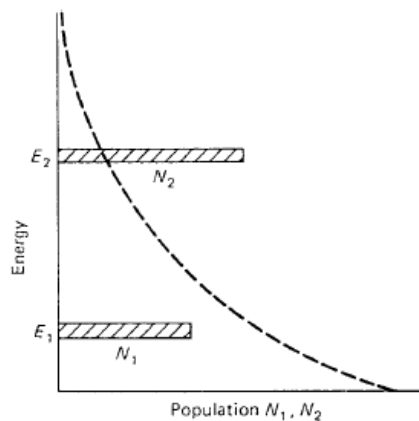


Figura 2.4.- Inversión de población

Una **inversión de población** existe cuando más electrones están en el estado excitado que en uno más bajo. El estado más bajo puede ser el estado base, pero puede ser también un estado excitado de menor energía. [8]

2.2 ELEMENTOS Y CARACTERÍSTICAS DE UN LÁSER

Los elementos básicos de un láser se componen de tres partes: una cavidad óptica resonante llamado el resonador óptico, un medio de ganancia de láser (también llamada medio activo) y una fuente de bombeo para excitar las partículas en el medio de ganancia, como se muestra en la figura 2.5. [9]

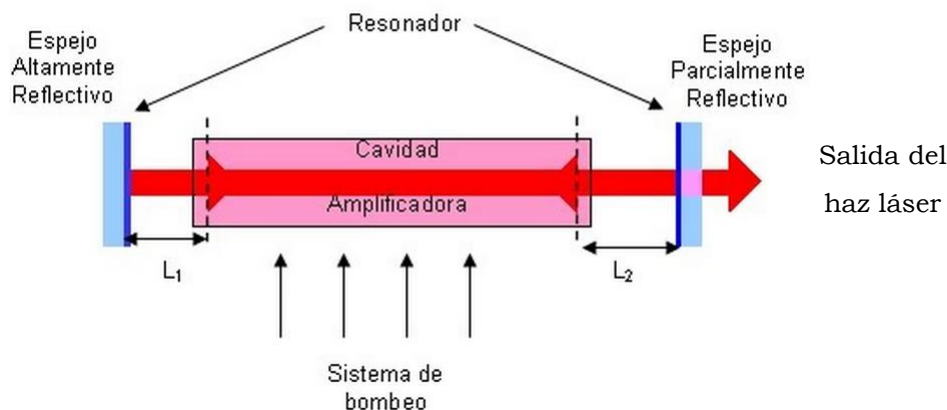


Figura 2.5 Elementos de un láser

El **resonador óptico** es un dispositivo esencial del oscilador óptico que es el encargado de generar el haz de luz láser. Se trata de dos espejos planos, o ligeramente cóncavos, colocados a los extremos de una cavidad contenedora, a través de cuyo reflejo se generará un haz de luz coherente o incoherente, según el tipo resonador óptico. La capacidad reflectora de los dos espejos no debe ser igual: uno deberá ser 100% reflectante, mientras que el otro será parcialmente reflectante, este último espejo se le denomina el acoplador de salida. [10]

Con el fin de operar, el láser requiere un **medio de ganancia** en el resonador, que amplifica la luz y por lo tanto compensa la pérdida a través del acoplador de salida. Los láseres se clasifican típicamente por el tipo de medio de ganancia que emplean (láser de gas, láser de estado sólido, láser de colorante, láser de semiconductor, etc.). El proceso de emisión estimulada se lleva a cabo en el medio de ganancia.

Las partículas activas en el medio de ganancia de láser tienen que estar en un estado de inversión para que el láser pueda operar. Para llegar a este estado



requiere un **sistema de bombeo**, que suministra la energía suficiente para excitar al medio activo desde un nivel de energía bajo a uno más alto para crear inversión de población. Los sistemas de bombeo típicos son de corriente eléctrica en un gas o un láser de semiconductor o el bombeo óptico en un láser de estado sólido o colorante. El bombeo óptico se logra con lámparas de flash o mediante otro láser.

Un láser no puede operar si la ganancia es menor que las pérdidas del resonador; el dispositivo está entonces por debajo del llamado umbral de láser y sólo emite luminiscencia. La potencia de salida significativa se logra sólo para potencias de bombeo por encima del umbral del láser, donde la ganancia puede superar las pérdidas del resonador. Si la ganancia es mayor que las pérdidas, la potencia de la luz en el resonador del láser se eleva rápidamente; por ejemplo, empezando con bajos niveles de luz de fluorescencia. Como altas potencias del láser saturan la ganancia, la potencia del láser en el estado estacionario llegará a un nivel de modo que la ganancia saturada sólo es igual a las pérdidas del resonador. Antes de llegar a este estado de equilibrio, un láser por lo general sufre algunas oscilaciones de relajación. El umbral de potencia del bombeo es la potencia del bombeo óptico, donde la ganancia de pequeña señal es sólo suficiente para la acción láser.

2.2.1 Propiedades de los láseres [11]

Las principales características de los láseres, lo que determina el alcance de las aplicaciones, son la coherencia, la direccionalidad, monocromaticidad.

Monocromaticidad: La energía de un fotón determina su longitud de onda a través de la relación $E = hc / \lambda$, donde c es la velocidad de la luz, h es la constante de Planck, y λ es la longitud de onda. En un caso ideal, el láser emite todos los fotones con la misma energía, y por lo tanto la misma longitud de onda y se dice que es monocromática. La longitud de onda es la distancia sobre la que la onda se repite y se representa por la letra λ . Cada color tiene su longitud de onda característica como se ilustra en la figura 2.6. Fuentes de luz convencionales emiten luz que consta de una amplia gama de longitudes de onda (es decir, colores); un láser, por otro lado, emite solamente una gama muy estrecha de longitudes de onda.

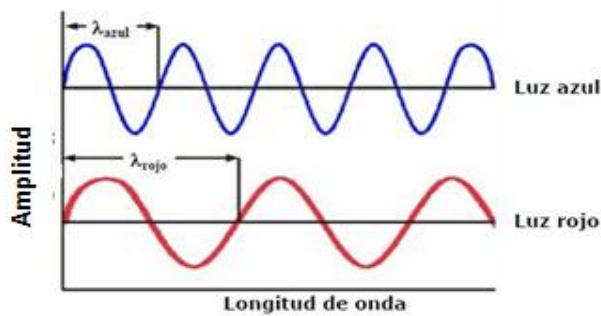


Figura 2.6 Comparación de las longitudes de onda del rojo y el azul

Coherencia: La figura 2.7 muestra un haz paralelo de radiación óptica desde una fuente común como ondas que viajan por el espacio. Ninguna de estas ondas presenta relación con las otras ondas dentro del haz. Se dice que esta luz es incoherente, o sea, no hay un orden interno.

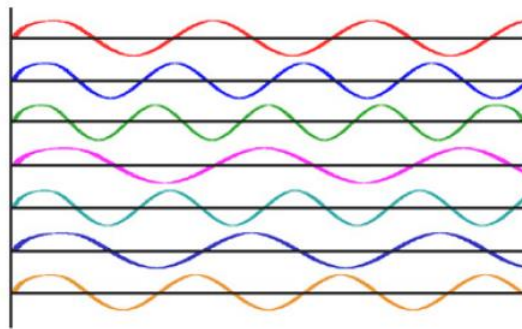


Figura 2.7 Ondas de radiación óptica incoherente

La figura 2.8 ilustra las ondas dentro de un haz láser altamente colimado. Todas las ondas individuales están en fase una con otra en cada punto. La coherencia es el término usado para describir la propiedad de fase de las ondas de radiación óptica del haz.

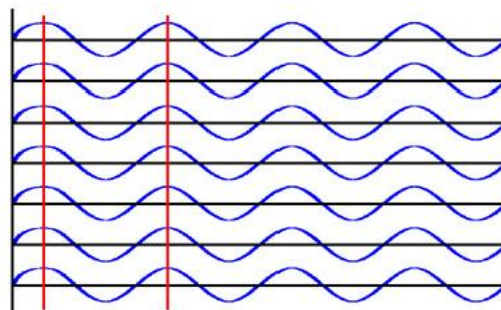


Figura 2.8 Ondas de radiación óptica coherentes

Direccionalidad: La figura 2.9 muestra la luz que es emitida por una bombilla en todas las direcciones. Todas las fuentes de luz convencionales emiten luz de esta manera.



Figura 2.9. Fuente convencional de luz

La figura 2.10 ilustra la naturaleza altamente direccional de un haz láser. La direccionalidad es la característica que hace que se desplace en una sola dirección dentro de un cono angosto de divergencia.

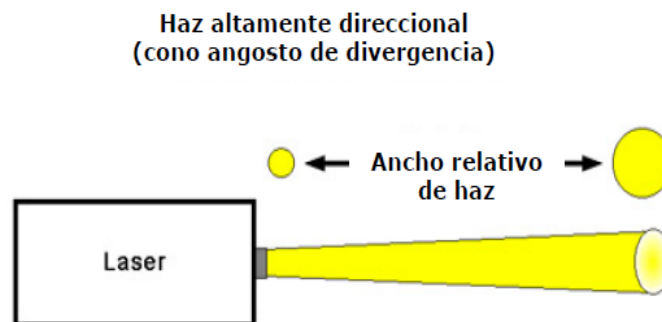


Figura 2.10. Direccionalidad del haz láser y su ancho relativo

2.3 OPERACIÓN BÁSICA DEL LÁSER

En la figura 2.11 se muestra la operación básica de un láser. A continuación de la imagen se explicarán los pasos para producir el fenómeno láser. [12,13]

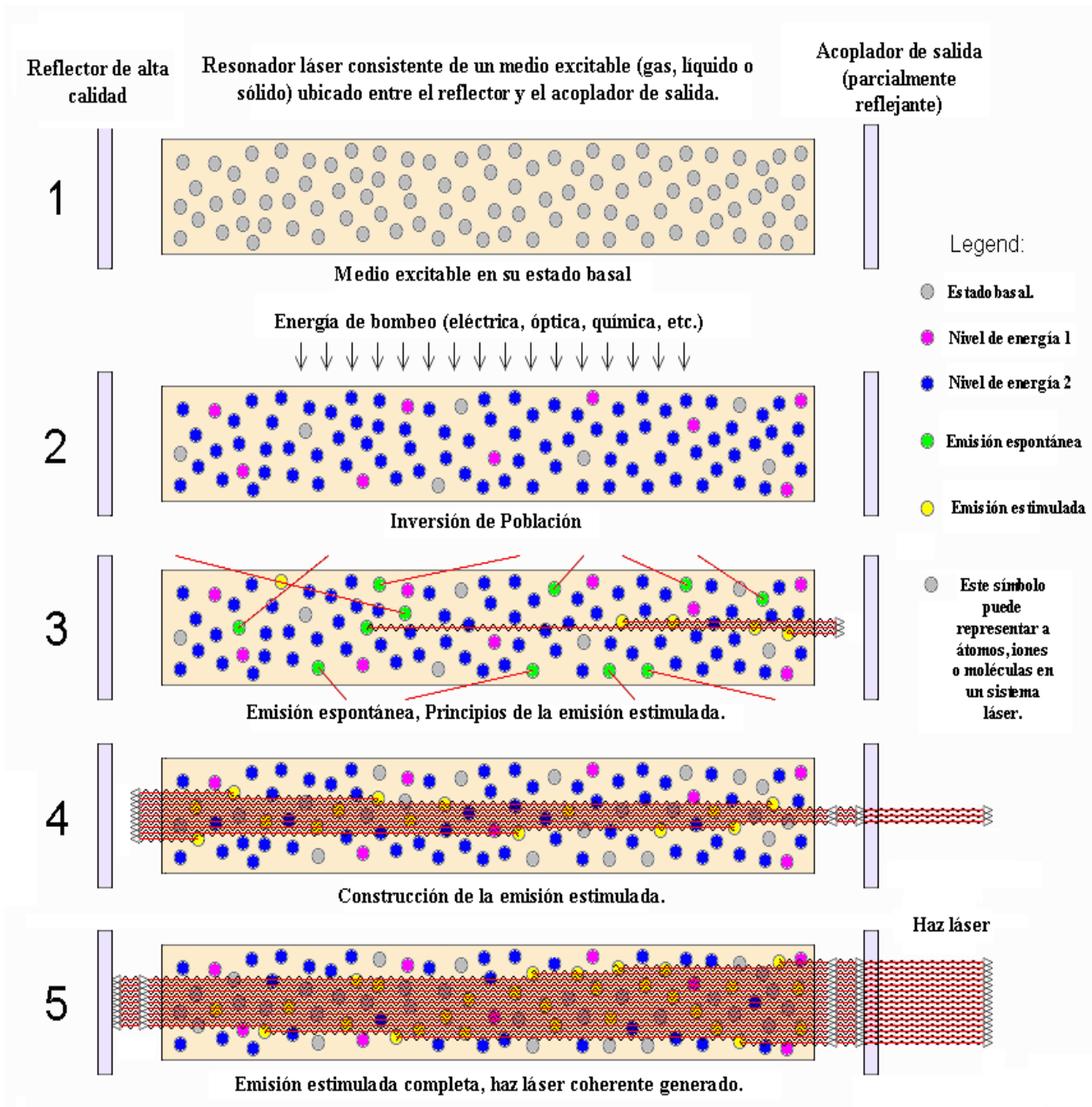


Figura 2.11. Operación básica de un láser.

1.- En su estado básico electrones del medio excitable se encuentran en su nivel más bajo de energía conocido como su estado basal.



2.- A continuación se lleva a cabo un bombeo de energía en el material excitable de tal forma que sus electrones se ubican en un nivel mayor de energía creando así una inversión de población, de esta forma participarán en la emisión estimulada, teniendo más importancia los electrones que se ubican en el nivel dos (para este caso).

3.- De forma aleatoria, estos electrones excitados caen a un nivel inferior de energía por sí mismos. En este proceso cada uno emitirá un solo fotón de luz de forma aleatoria. Esto es llamado "emisión espontánea" y por sí mismo no es de mucha utilidad para algún proceso. El mismo proceso es básicamente el que explica el brillo de un letrero de gas de neón, o la capa de fósforo de una lámpara fluorescente o pantalla de un TRC.

Sin embargo Einstein mostró que si uno de estos fotones encontraba en su camino a un electrón excitado, este fotón lograría que el electrón respectivamente decayera en su nivel de energía produciendo de esta forma un fotón, el cual presentaría las mismas características que el primigenio. Las características son:

- a) El nuevo fotón tendrá exactamente la misma longitud de onda.
- b) El nuevo fotón tendrá exactamente la misma fase.
- c) El nuevo fotón será emitido exactamente en la misma dirección que el fotón primigenio.
- d) En la mayoría de los casos el nuevo fotón tendrá la misma polarización que el fotón primigenio. Sin embargo es posible que el resonador proporcione una orientación diferente al haz láser lo que hará que este se polarice.

Los fotones producidos se moverán en direcciones aleatorias, unos se escaparán por algunos de los lados del tubo de resonancia mientras que otros rebotarán en los espejos y se escaparán al chocar con los contornos del tubo.

3 y 4.- De forma ocasional existen algunos fotones que se mueven de forma paralela en dirección longitudinal del tubo de resonancia. En este caso estos fotones cruzarán el tubo de resonancia hasta chocar con algún espejo, lo que hará que estos viajen en dirección contraria, este proceso se repetirá varias veces. Los fotones al ir



viajando de un lado al otro del tubo de resonancia irán encontrando diversos electrones excitados que producirán de esta forma fotones nuevos con las mismas características que los que están cruzando el tubo. Así los fotones producidos reforzarán la producción de más fotones teniendo así una avalancha de éstos a través del proceso de emisión estimulada.

5.- El haz producido será altamente monocromático (muy próximo a la misma longitud de onda) y coherente (todas las ondas estarán en fase). De igual forma el haz estará colimado (los fotones viajarán de forma paralela) o por lo menos se observará que surge a partir de un punto (diodos láser). En cualquiera de los casos el haz de luz obtenido puede ser manipulado de diferentes formas mismas que no se pueden realizar con la luz proveniente de una fuente convencional de luz.

Si la fuente de bombeo es adecuada y puede estar excitando de forma constante a los electrones del medio excitable para que estos se ubiquen en niveles de energía superiores, la emisión estimulada sucederá de forma continua e indefinida (existen problemas de calentamiento y problemas de bajas y altas corrientes que interfieren con esta operación indefinida) produciendo así un láser de onda continua. Si el bombeo no puede ser mantenido de forma constante o los niveles de energía no pueden ser mantenidos con constancia el resultado será un láser pulsado.

2.4 CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD EN LOS LÁSERES [14]

Existen diferentes organizaciones encargadas de establecer los lineamientos de seguridad para el uso de sistemas láser. Uno de los más importantes es el Centro de Dispositivos y Salud Radiológica (CDRH-Center for Devices and Radiological Health).

Este centro es parte de la administración de comida y fármacos de los Estados Unidos, siendo la organización más importante en ese país; para el comercio y la actividad científica de los láseres.

Los láseres son catalogados por el fabricante y etiquetados de forma apropiada dependiendo de los riesgos que implica el láser. Los siguientes criterios son utilizados para clasificar a los láseres:



- a) Longitud de onda: si el láser está diseñado para emitir diferentes longitudes de onda la clasificación se basará en la longitud de onda más peligrosa.
- b) Se considera el tiempo de exposición inherente al diseño tanto para los láseres de Onda Continua (CW) como para los láseres pulsados.
- c) En el caso de los láseres pulsados se considera la energía total por pulso, la duración del pulso, la razón de repetición y la radiación emergente del haz.

Los láseres se clasifican y controlan de acuerdo al siguiente criterio:

- **Láseres Clase I:** Este tipo de láseres no presentan ningún riesgo al estarlos viendo de forma continua. Están diseñados de tal forma que no es posible tener acceso a la radiación láser. A este tipo de láseres pertenecen los láseres de baja potencia o los láseres de alta potencia incrustados en sistemas específicos como las impresoras láser.
- **Láseres Clase II (láseres visibles de 400 a 700 nm):** Este tipo de láseres emiten luz visible para la cual existe una respuesta de aversión del ojo humano. Estos dispositivos no presentan ningún peligro a menos que sean vistos directamente por largos períodos de tiempo. Esto sucede con la mayoría de las fuentes de luz de gran intensidad.
- **Láseres Clase IIa (láseres visibles de 400 a 700 nm):** Este tipo de láseres emiten luz visible la cual no está hecha para su observación directa. Bajo condiciones normales de funcionamiento no se producirá un daño en el ojo a menos de que sea visto de forma continua por lo menos durante 1,000 segundos. Ejemplo de este tipo de láseres son los láseres lectores de códigos.
- **Láseres Clase IIIa:** Este tipo de láseres normalmente no causan daño al ojo si su haz es visto de forma momentánea pero pueden producir daños si se utilizan medios ópticos para manipular el haz (colimadores, fibras ópticas, etc.)

- **Láseres Clase IIIb:** Estos láseres generan daño si su haz es visto de forma directa o se ponen en contacto directo con la piel. Esto incluye el ver directamente el haz así como las reflexiones del haz que se puedan dar. Los láseres Clase IIIb no producen reflexiones difusas peligrosas a menos que sean vistas de forma muy próxima.

- **Láseres Clase IV:** Este tipo de láseres representan un peligro para la visión si su haz es visto de forma directa o a través de reflexiones en espejos o al obtener reflexiones difusas. Además este tipo de láseres presentan el riesgo de producir fuego así como quemaduras en la piel.

En la tabla 2.2 se establecen los intervalos de potencia del haz para cada clasificación:

Tabla 2.2 Clasificación de los láseres en base a su potencia de salida. [11]

Clase	Potencia máxima (mW)	Símbolo impreso	Texto en la etiqueta precautoria
I	≤ 0.39	No necesario	No necesario
IIa	(0.39,1)Exposiciones menores a 1,000 seg.	No necesario	No necesario
IIb	≤ 1	Precaución	Radiación láser. No fije la mirada en el haz.
IIIa	≤ 5	Precaución(irradiación $<2.5\text{mw}/\text{cm}^2$)	No fije la mirada en el haz o no vea directamente el haz a través de instrumentos ópticos.
IIIb	≤ 500	Peligro	Evite la exposición directa al haz
IV	>500	Peligro	Evite la exposición del haz en el ojo o en la piel.



2.5 DIODOS LÁSER PARA BOMBEO ÓPTICO DE LÁSERES DE ESTADO SÓLIDO.

Los diodos láser modernos están fabricados con una amplia variedad de arquitecturas, paquetes y nivel de potencia. En esta sección solo consideraremos el diodo laser de AlGaAs (Aluminio-Galio-Arsénico) ya que es el que se utilizará en el experimento.

Los diodos de AlGaAs pueden ser diseñados para emitir a una longitud de onda aproximadamente en el rango de 725 nm a 850 nm (nanómetro). La emisión de la longitud de onda es determinado por la proporción de Al (Aluminio) a Ga (Galio) en la región activa, cuanto mayor sea la concentración de Al será más corta la longitud de onda de salida. Desde el mercado para láseres de alta potencia son impulsados por bombeo de materiales dopados. La gran mayoría de diodos vendidos para bombeo de láseres producen una emisión en el rango de 808 a 810 nm.

Un diodo de heterounión se muestra en la figura 2.12, los láseres semiconductores operan haciendo pasar la corriente a través de la unión $p-n$, los electrones que viajan en la región n deben de tener más energía que los que viajan en la región p . Por lo tanto, cuando el electrón de la región n pasa a la región p , que tiene exceso de energía. Este exceso de energía se pierde por la emisión del fotón. El LED (del acrónimo en inglés **L**ight **E**mitting **D**iode) que significa Diodo Emisor de Luz opera con este mismo principio. La característica que distingue los diodos láser de un led es que la densidad de electrones energéticos localizada en la región p es suficiente para producir emisión estimulada. Como en un láser tradicional, la ganancia media está contenida dentro de un resonador láser. Sin embargo, en el caso de los diodos láseres, los espejos del resonador son las caras de los extremos del propio chip semiconductor. [15]

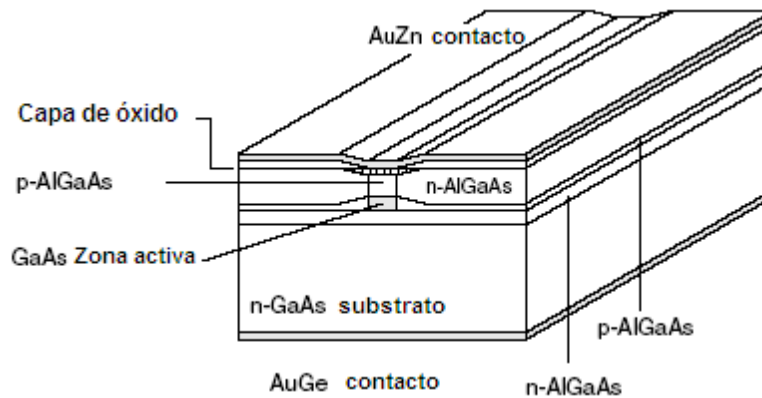


Figura 2.12 Diodo de heterounion

Varios términos que se utilizan para analizar las diversas características de los diodos láseres que valen la pena revisar, referente a la figura 2.12 la región de la estructura que produce la ganancia es llamada “capa activa” o “región activa”. El contenido de Al (Aluminio) en esta capa determina la longitud de onda de salida, y como se muestra, la luz emitida del láser es producida en esta capa.

El resonador láser está compuesto de dos espejos planos extremos. Estos espejos están formados mediante la escisión de las caras extremas (llamado “facetas”) del dispositivo semiconductor. Las caras pueden estar recubiertas para producir una reflectividad deseada, o puede ser previsto con un recubrimiento de “pasivación” para proteger las facetas de daños o contaminación por indicios contaminantes en el aire. El alto índice de refracción de AlGaAs produce el 30 % de reflectividad por facetas (sin recubrimiento), generando suficiente retroalimentación para una salida eficiente del diodo láser. Ya que un diodo láser emite luz a través de ambas facetas, diodos de alta potencia son típicamente cubiertos HR (siglas que significan altamente reflectante) en la faceta trasera. La corriente eléctrica que fluye a la unión entra al dispositivo a una “franja” de contacto. Este contacto recorre toda la longitud del diodo, y diodos individuales, ya sea discretos uno de los muchos contenidos en una matriz de diodos, se denominan como diodos de una sola franja.

2.5.1 Diodos monomodo

Los diodos monomodo producen salidas en un solo longitudinal, así como el modo transversal. La alta potencia producida por un diodo monomodo de AlGaAs comercial



es de 200 mW. Las ventajas del diodo monomodo para el bombeo de láser consisten en que un sumamente pequeño tamaño de punto de bombeo enfocado (concentrado) puede ser obtenido. Las propiedades espaciales de salida del haz del diodo son excelentes así. Además la longitud de onda de salida del láser monomodo puede ser sintonizado(a lo largo de varios nanómetros) para que coincida el centro de una línea de absorción en el cristal láser de estado sólido, esto permite la deposición de potencia de bombeo de alta densidad. La longitud de onda de sintonización se logra mediante el cambio de temperatura de la unión; la longitud de onda de salida del láser aumenta a la tasa de $+0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. La temperatura de sintonización para el pico de absorción combinada con la alta calidad del haz produce bajo umbral, operación laser de alta pendiente de eficiencia. Los diodos monomodos son significativamente más costosos por Watt pero son útiles para el bombeo compacto, láseres de baja potencia.

2.5.2 Operación del diodo pulsado y Onda Continua (CW)

Diodos laser individuales son inherentemente dispositivos de onda continua. Bajo la operación QCW (Quasi-Continuos-Wave). Las características de salida del diodo de estado estacionario son esencialmente CW y la potencia de salida pico producido por un diodo de una sola franja es limitada a la potencia máxima de salida CW. Para altas potencias lineales o matrices de diodos bidimensionales, la eficiencia de enfriamiento determina el máximo factor de trabajo del dispositivo. El factor de trabajo representa el porcentaje del diodo laser “en el tiempo”. Por ejemplo una matriz lineal con un factor de trabajo del 20% indica que el ancho de pulso no puede exceder el 20 % de la inversa de la frecuencia de repetición de pulso. Éstos limitaría tales arreglos produciendo pulsos de $100\mu\text{s}$ a una tasa de repetición de 2 kHz, el calor generado en la unión $p-n$ debe ser removido rápidamente para permitir el funcionamiento del diodo, a medida que la carga de calor cada vez es más severa el factor de trabajo aumenta. Debido a la baja conductividad térmica del sustrato semiconductor, incluso los más avanzados diseños de paquetes de diodos tienen una capacidad limitada de enfriamiento. Éstos limita la densidad de empaque de franjas en una matriz de CW aproximadamente la mitad de la densidad de empaque de un arreglo QCW con factor bajo de trabajo.



2.5.3 Condiciones de fabricación de diodos

Hay varios métodos que son usados para producir diodos laser. El proceso más común es la deposición química de vapor de metal-orgánicos. El proceso de fabricación de depositar capas con la composición deseada elemental III-V y el espesor sobre un sustrato de GaAs calentado es llamado “epitaxia” ocurre el crecimiento epitaxial en el sustrato GaAs en la forma de un disco delgado o “oblea”, típicamente en un diámetro de 5-10 cm. desde las cavidades ópticas del diodo son generalmente varios cientos de micras de largo, un gran número de diodos pueden ser fabricados en una sola oblea. La oblea terminada es escindida o "picada" en láseres individuales o matrices lineales. Escindir produce las facetas que sirven como los espejos extremos del láser. Escisión es eficaz debido a que el GaAs se fractura fácilmente a lo largo de ciertos cristales planos bien definidos.

Los láseres se sueldan sobre un disipador de calor de cobre, el cual también actúa como la conexión eléctrica a tierra. El otro lado del diodo contiene un conductor eléctrico que está unido o "cable unido". Diodos de alta potencia son fabricados con el lado p abajo para una mejor administración térmica, así que el “cable unido” para conducir requiere un voltaje negativo.

Los diodos de una sola franja pueden ser vendidos en paquetes abiertos, que consisten en una placa de montaje de cobre que sirve como la tierra y una espiga de alambre para conectar el conductor eléctrico negativo. Paquetes sellados herméticamente están también disponibles para estos diodos, con latas TO3 y 9 mm que representan los tipos de paquetes más comunes. Algunos paquetes de laser incluyen fotodiodo para controlar la potencia de salida del láser, otros paquetes incluyen un refrigerador termoeléctrico para eliminar el calor procedente del diodo y regular la temperatura de la unión.

2.5.4 Matrices de diodo láser

Matrices de diodo láser, también llamadas barras de diodos, son muy importantes las fuentes de luz que se utilizan generalmente para el bombeo de otros láseres de estado sólido y en aplicaciones médicas e industriales que requieren alta potencia, pero de baja intensidad. A pesar de que son muy interesantes desde el punto de



vista comercial, no encuentran su camino en muchas aplicaciones importantes debido a su calidad de haz muy bajo y el brillo espectral.

Los arreglos de diodos laser son matrices lineales de diodos de una sola franja fabricado en un sustrato continuo de GaAs. Las matrices pueden ser por fases o incoherentes, aunque matrices de fase no son comunes y son de interés principalmente por su importancia histórica. A mediados de la década de 1980 los diodos láser de alta potencia se producían como matrices de fase, que consiste en 10 o menos franjas que abarca un ancho total de aproximadamente 200 μm . las regiones entre cada franja fueron no excitadas y por lo tanto es absorbente. Históricamente, la preocupación era que si se utilizara una sola franja amplia, caminos de fotones transversales al eje del láser generarían ASE suficiente para producir el funcionamiento ineficiente

2.5.5 Ventajas del bombeo por diodo láser [16,17]

El uso del diodo láser en lugar de las lámparas de destello como fuente de bombeo óptico para los laser de estado sólido ofrece ventajas significativas como una mayor eficiencia y más tiempo de vida.

El interés ha aumentado en los últimos años en utilizar diodo láser semiconductor para excitar a los láseres de estado sólido basado en tierras raras dopadas con iones sólidos transparentes como Nd:YAG. Tradicionalmente estos láseres en estado sólido eran excitados por lámparas de destellos que emiten radiación en su banda ancha. El sistema de bombeo por lámparas son ineficientes, sin embargo con el 1% de eficiencia eléctrico-óptico las lámparas necesitan reemplazarse aproximadamente después de 200 horas cuando se hace funcionar continuamente. La fuente de bombeo por diodo láser permite en la operación una alta eficiencia del 10% y larga duración (20,000 horas).

Las ventajas potenciales de las fuentes de luz de semiconductores respecto a las lámparas para el bombeo óptico de láseres de estado sólido han sido reconocidas a principios de 1960. Pero el bombeo por diodo láser no se comenzó a practicar hasta principio de 1980, cuando la fuente tenía alta eficiencia, el láser semiconductor llegó a ser ampliamente seguro y disponible. El laboratorio Lincoln ha

participado en el desarrollo de estos láseres desde el comienzo, el primer diodo laser para bombeo fue un $U^{3+}:\text{CaF}_2$ fue demostrado en el laboratorio Lincoln por R.J.Reyes y T.M. Quist en 1964. Para la operación del diodo laser se requieren bajas temperaturas durante el uso, por lo tanto se colocó todo el conjunto en un criostato de helio líquido para enfriar. Las investigaciones continuaron en el laboratorio Lincoln en 1970 con más esfuerzos dedicados a la investigación de materiales de láseres de estado sólido dopados relativamente con altos niveles de Nd (neodimio).

Comparación del bombeado por diodo laser y otras tecnologías competidoras.

Las principales ventajas del diodo láser sobre las lámparas de flash como fuente de bombeo óptico son su eficiencia total del láser y su extensa vida útil como fuente de bombeo. El aumento de la eficiencia se debe a la mejora de la utilización de la radiación de bombeo óptico. En la figura 2.13 se muestra el espectro de absorción del material láser de estado sólido más común (Nd: YAG), y el espectro de salida de una lámpara de destello pulsada y con un diodo láser, ilustra el aumento de la eficiencia. Nd: YAG tiene absorción óptica solo relativamente en longitudes de onda de la banda estrecha. Por lo tanto la mayor parte de la energía de la lámpara de destello de banda ancha pasa a través del material sin ser absorbida.

Por otro lado, la salida del diodo láser es de banda estrecha, por lo que la mayor parte es absorbida y utilizada.

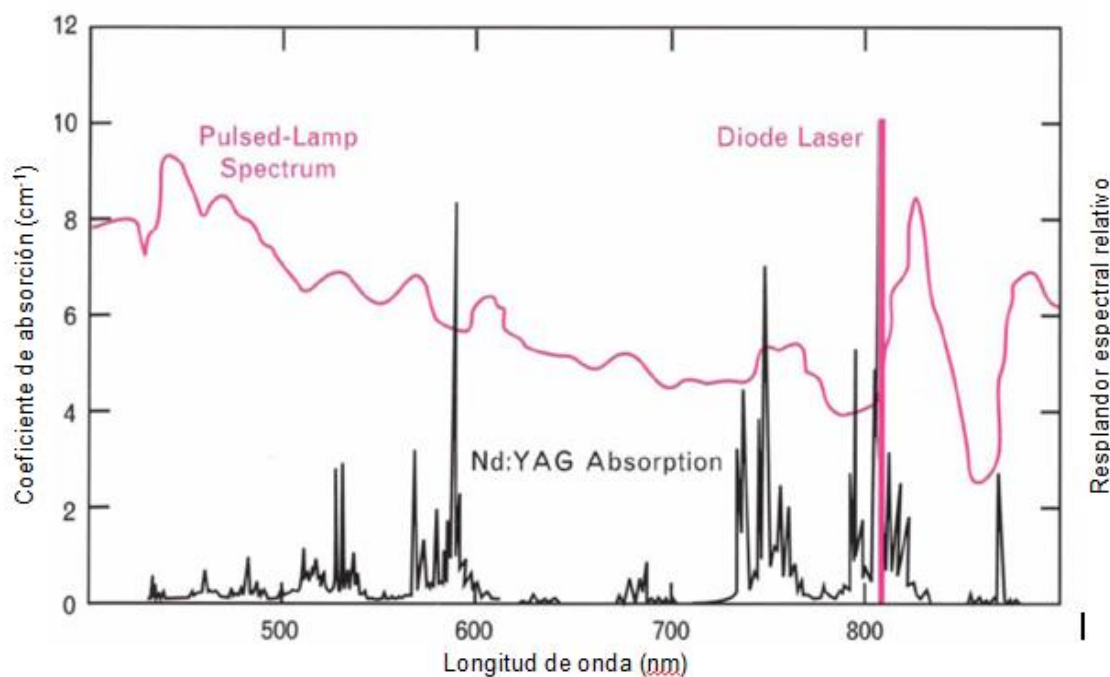




Figura 2.13 Espectro de absorción del Nd: YAG, el espectro de emisión del diodo laser y una lámpara de destello pulsada, el espectro de absorción es para 1% -dopado Nd: YAG. La lámpara de destello pulsada emite radiación para todas las longitudes de onda mientras que el diodo laser emite radiación esencialmente a una longitud de onda que puede ser sintonizado a una línea de absorción específica del Nd: YAG.

Las lámparas de destellos pulsada convierten la energía eléctrica en energía óptica más eficientes que los diodos láseres (80% de eficiencia comparado a 30%-50% de eficiencia), pero debido a la ineficiente absorción de la radiación de bombeo, la lámpara de bombeo de laser Nd solamente son eficientes el 1% mientras que el bombeo por diodo laser son eficientes el 10%. Este aumento de eficiencia conlleva a otras consecuencias favorables. La cantidad de calor residual generado en el Nd: YAG disminuye por un factor de 3 en comparación con las lámparas de destellos, lo que reduce los requisitos de enfriamiento y permite el uso de enfriamiento por conducción en lugar de fluir líquido en muchos casos.

Cuando el Nd: YAG es bombeado con lámparas Kr arc continuo en lugar de lámpara de destello pulsada, la disminución de la carga térmica es menor. El calor residual también causa distorsión térmica del medio de ganancia, lo que disminuye el rendimiento del láser, estos problemas son reducidos con el bombeo por diodo laser.

2.6 RESONADORES

Los resonadores láseres son estructuras abiertas compuestas por dos muy importantes espejos que son alineados para producir retroalimentación óptica al elemento de ganancia. En un simple caso, un resonador consiste de dos espejos alineados. Estos espejos son llamados espejos finales y definen la cavidad óptica. La radiación óptica circula dentro de la cavidad. Rebotando entre los espejos finales y así pasar a través del elemento de ganancia. [18]

Los resonadores pueden ser estables o inestables. La estabilidad es determinada por los radios de curvatura en los espejos, el espacio entre los espejos y el índice de refracción del material en la ruta de recirculación. En un resonador estable de modo de menor orden permanece cerca del eje óptico, y la difracción de pérdidas son pequeñas. La emisión estimulada toma lugar solo dentro de un

volumen relativamente delgado en la ganancia del elemento. Los modos de orden superior son necesarios para extraer toda la potencia disponible a partir del volumen de bombeo, cuando la luz del bombeo llena la barra. Los resonadores inestables, por otra parte, tienen modos de volumen que son típicamente más grandes. Estos resonadores son caracterizados por grandes pérdidas de difracción, y de hecho, la difracción se extendió más allá de uno los espejos finales y pueden ser usado en una salida como acoplamiento mecánico. Los resonadores inestables son particularmente utilizados para los medios de alta ganancia, tal como ciertos láseres de gas o colorantes, pero los resonadores estables son muy prácticos para bombeo por diodo láser.

2.6.1 Estabilidad del resonador láser

Un resonador estable es un resonador en el que se captura la radiación dentro de él, produciendo ondas estacionarias mientras el haz se mueve de un extremo a otro entre los espejos. La estabilidad del resonador se expresa matemáticamente a través del criterio de estabilidad $0 < g_1 g_2 < 1$. Conociendo la distancia (L) que existe entre los dos espejos y los radios de curvatura R_1 y R_2 de cada uno de ellos (figura 3.14), los parámetros g_1 y g_2 se definen a partir de las ecuaciones siguientes

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \quad \text{ecuacion 3.13}$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \quad \text{ecuacion 3.14}$$

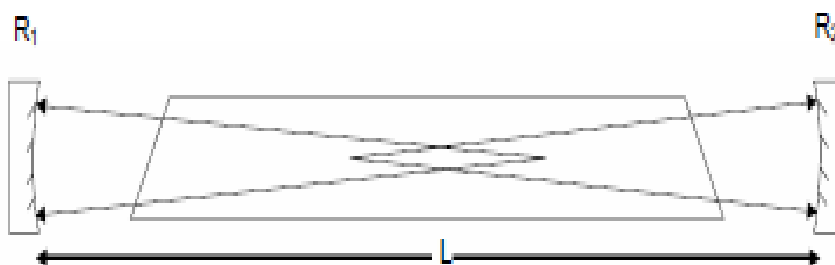


Figura 2.14.- Parámetros que intervienen en la estabilidad

En la Figura 2.15 se muestra el diagrama de estabilidad de un resonador pasivo construido en base a los parámetros g como ejes coordenados. Cada punto en ese diagrama corresponde a un tipo particular de resonador, por ejemplo, la coordenada $(1,1)$ corresponde a un resonador tipo plano paralelo. Todas las configuraciones que se encuentren entre los ejes coordenados y la hipérbola formada por $g_1g_2 = 1$ representarán resonadores estables y las configuraciones fuera de estos límites serán inestables. Los resonadores que se localicen a lo largo de la línea punteada orientada a 45 grados con respecto a los ejes coordenados, representan resonadores simétricos, es decir que los radios de curvatura de ambos espejos son iguales. [19]

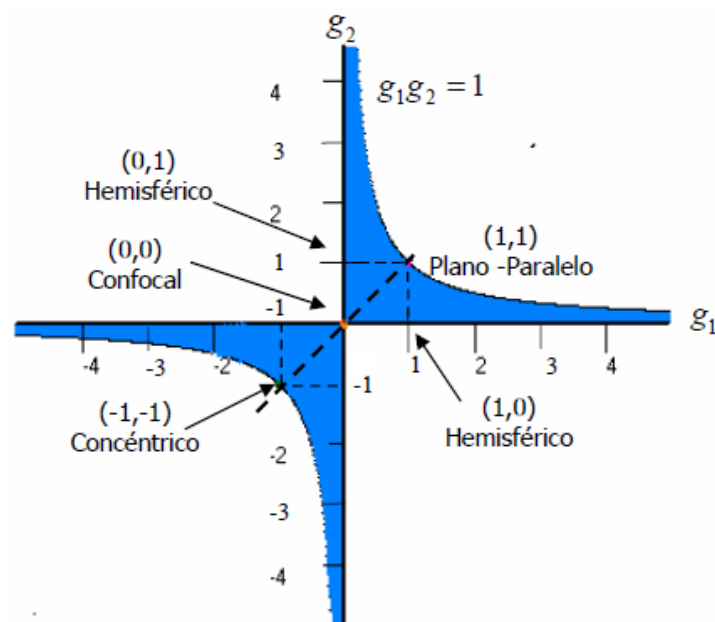


Figura 2.15 Diagrama de estabilidad



2.7 PROPIEDAD DE LOS MATERIALES PARA LÁSERES DE ESTADO SÓLIDO

Los materiales para el funcionamiento del láser deben poseer fuertes líneas fluorescentes, fuerte absorción en sus bandas, y razonablemente alta eficiencia cuántica para la transición fluorescente de interés. Estas características generalmente son mostradas por sólidos (cristales o vidrio) que incorporan en pequeñas cantidades de elementos en los que se pueden producir transiciones ópticas entre los estados del interior, capas incompletas del electrón. Así los metales de transición, series de tierras raras (lantánidos) y la serie de actínidos son de interés en este sentido. Las líneas fluorescentes definidas en el espectro de cristales dopados con estos elementos resultan del hecho de que los electrones que participan en las transiciones en el régimen óptico están protegidos por las capas externas de la red cristalina que rodea. Las transiciones correspondientes son similares a la de los iones libres. [20]

Más láseres de estado sólido emiten radiación en la región espectral en el rango de 400 nm a 3 μm que es basado en las transiciones 4f-4f de tierras raras y transiciones 3d-3d de metales de transición dopado con cristales. Además de una fuerte línea de emisión de fluorescencia, un material láser debe poseer bandas de bombeo dentro del espectro de emisión de las fuentes de bombeo fácilmente disponibles, tales como lámparas de arco y las matrices de diodos láser.

2.6.1 Láser de estado sólido de Nd: YVO₄

El cristal de Otovanadato de Itrio dopado con Neodimio (Nd: YVO₄) ver figura 2.16 está convirtiéndose en uno de los láseres de estado sólido más importantes. Este tiende a reemplazar al Nd: YAG en algunas aplicaciones, debido a algunas ventajas del Nd: YVO₄ sobre el Nd: YAG para láseres de estado sólido bombeados por diodos. Este cristal tiene un alto coeficiente de absorción y gran absorción a la longitud de onda de bombeo, buenas características físicas, ópticas y mecánicas. Los descubrimientos recientes han demostrado que el Nd: YVO₄ pueden producir IR de gran alcance y es estable. Comparado con el Nd: YAG y Nd: YLF, los láseres Nd: YVO₄ poseen las ventajas de una dependencia más bajas en la longitud de onda de bombeo y del control de la temperatura de un diodo láser, banda ancha de

absorción, umbral más bajo de laseo, emisión linealmente polarizada. El láser Nd: YVO₄ demuestra ventajas particulares sobre otros cristales de estado sólido. [21]

Los láseres Nd: YVO₄ poseen:

- Umbral de laseo más bajo.
- Sección transversal grande de la emisión estimulada en la longitud de onda de laseo.
- Alta absorción sobre un ancho de banda de bombeo de la longitud de onda
- La dependencia baja en la longitud de onda de bombeo y tiende a la salida de un solo modo.



Figura 2.16 Cristal Nd: YVO₄

Las características básicas y ópticas se encuentran en las tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3. Características básicas

Densidad atómica: $\sim 1.37 \times 10^{20}$ átomos/cm ²
Estructura cristalina: Zircón tetragonal, grupo D _{4h} del espacio, a= b= 7.12,c = 6,29
Densidad: 4,22 g / cm ²
Dureza de Mohs: vidrio ~ 5
Coefficiente térmico de expansión: $\alpha_a = 4.43 \times 10^{-6}$ /K, $\alpha_c = 11.37 \times 10^{-6}$ /K
Coefficiente de conductividad térmica: C: 5.23 W/m /K; \perp C: 5.10 W/m /K



Tabla 2.4. Propiedades ópticas

Las longitudes de onda de emisión láser(laseo)	914nm, 1064 nm, 1342 nm
Clase de cristal	positivo uniaxial, $n_o = n_a = n_b$, $n_e = n_c$, $n_o = 1,9573$, $n_e = 2,1652$, @ 1064 $n_o = 1,9721$, $n_e = 2,1858$, @ 808nm $n_o = 2,0210$, $n_e = 2.2560$, @ 532nm
Ecuación de Sellmeier (para cristales YVO ₄ puros):	$n_o^2 = 3.77834 + 0.069736 / (\lambda^2 - 0.04724) - 0,0108133 \cdot \lambda^2$ $n_e^2 = 4.59905 + 0.110534 / (\lambda^2 - 0.04813) - 0,0122676 \cdot \lambda^2$
Coeficiente térmico óptico:	$dn_a / dT = 8.5 \times 10^{-6} / K$, $dn_c / dT = 3.0 \times 10^{-6} / K$
Sección de emisión estimulada	$25.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, @ 1064 nm
Tiempo de relajación	90 μs (unos 50 μs de 2 atm% Nd dopado) @ 808 nm
Coeficiente de absorción	$31,4 \text{ cm}^{-1}$ @ 808 nm
Longitud de absorción	0,32 mm @ 808 nm
Pérdida intrínseca	Menos del 0,1% cm^{-1} , @ 1064 nm
Ancho de banda de ganancia	0,96 nm (257 GHz) @ 1064 nm
Emisión polarizada del laser	Polarización π ; paralelo al eje óptico (eje c)
Eficiencia óptica del bombeo óptico	> 60%



CAPITULO III

DINÁMICA NO LINEAL Y CAOS EN LÁSERES

3.1 SISTEMAS LINEALES Y NO LINEALES

Desde que empezaron los estudios experimentales en los láseres, los físicos se dieron cuenta de que su comportamiento dinámico errático no se podría interpretar como simplemente disturbio mecánico, acústico, o eléctrico. En 1964 las simulaciones de computadora de la dinámica de láser mostraron un comportamiento aperiódico no conducido por el ruido (conocido actualmente como caos determinista). Tiempo después en 1982, el caos, entre otros efectos no lineales, fue demostrado para existir en un sistema experimental. El comportamiento caótico se ve errático y aleatorio casi como el comportamiento de un sistema fuertemente influenciado por el exterior, el "ruido". [22,23]

El caos en sí es realmente sólo un tipo de comportamiento exhibido por los sistemas no lineales. El campo de estudio es llamado dinámica no lineal que se ocupa del estudio de los sistemas cuyas ecuaciones de evolución temporal no son lineales. Podemos definir a un sistema no lineal como:

Un sistema no lineal es un sistema cuyas ecuaciones de evolución temporal no son lineales, es decir, las variables dinámicas que describen las propiedades del sistema, por ejemplo: posición, velocidad, aceleración, presión, etc. Aparecen en las ecuaciones en una forma no lineal.

Ilustraremos esta definición con dos ejemplos de mecánica elemental, uno un sistema lineal, el otro no lineal. En la mecánica clásica el comportamiento de un sistema formado por un punto de partícula con masa m y sujeto a una fuerza F_x que actúa en la dirección de x , y obligado a moverse sólo en la dirección x está dada por la segunda ley de movimiento de Newton.

$$F_x(x, t) = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{ecuación 3.1}$$

Es familiar en física en el caso de un punto de masa sometido a la fuerza de un resorte ideal, la fuerza viene dada por:

$$F_x = -kx \quad \text{ecuación 3.2}$$



Donde x es el desplazamiento del resorte desde la posición de equilibrio (donde $F_x = 0$) y k es llamado la constante del resorte, una medida de la rigidez del resorte. Combinando las ecuaciones 3.1 y 3.2, encontramos que la ecuación de evolución en el tiempo para la posición de la partícula es:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \quad \text{ecuación 3.3}$$

Esta ecuación es lineal en x y en la segunda derivada de x (aceleración). por lo tanto se describe un sistema lineal. Si la masa se desplaza de la posición de equilibrio y se suelta, entonces va oscilar alrededor de la posición de equilibrio de forma sinusoidal con una frecuencia angular.

$$w = \sqrt{k/m} \quad \text{ecuación 3.4}$$

Para el segundo ejemplo, tenemos la fuerza F_x y $F = bx^2$, entonces la ecuación de evolución en el tiempo es:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{b}{m}x^2 \quad \text{ecuación 3.5}$$

Ahora podemos observar que el sistema no es lineal, debido a que la posición de la partícula x aparece en la ecuación cuadrática.

Podemos decir que el sistema es lineal si, y sólo si, cumple las condiciones siguientes:

Supongamos que $g(x, t)$ y $h(x, t)$ son soluciones linealmente independientes de la ecuación de evolución en el tiempo para el sistema; entonces $cg(x, t) + dh(x, t)$ es también una solución, donde c y d pueden ser cualquier número. Observación: $g(x, t)$ y $h(x, t)$ son funciones linealmente independientes si $\alpha g(x, t) + \beta h(x, t) = 0$ es verdadero para todo x y t y que $\alpha = 0$ y $\beta = 0$.

Ahora bien podemos expresar la noción de no linealidad en términos de la respuesta de un sistema para estímulos. Supongamos que $h(x, t)$ da la respuesta del sistema a un estímulo particular $S(t)$. Si ahora cambiamos $S(t)$ a $2S(t)$, un sistema lineal tendrá



la respuesta $2h(x, t)$. para un sistema no lineal, la respuesta será más grande o más pequeño que $2h(x, t)$. [24]

3.1.1 No linealidad y caos

Algunos cambios repentinos y dramáticos en los sistemas no lineales dan lugar al comportamiento complejo llamado caos. El sustantivo *caos* y el adjetivo *caótico* se utilizan para describir el comportamiento temporal de un sistema cuando ese comportamiento es aperiódico (nunca se repite exactamente) y es aparentemente aleatorio y ruidoso. Esta aleatoriedad caótica aparente es un orden determinado, en un cierto sentido, por las ecuaciones que describen el sistema. De hecho, la mayoría de los sistemas son completamente deterministas. En general necesitamos estos tres ingredientes para determinar el comportamiento de un sistema.

- Las ecuaciones de evolución temporal
- Los valores de los parámetros que describen el sistema
- Las condiciones iniciales

Un sistema se dice que es determinista si el conocimiento de las ecuaciones de evolución temporal, los parámetros que describen el sistema, y las condiciones iniciales (por ejemplo, la posición x y la velocidad $\frac{dx}{dt}$ en $t = 0$ para las ecuaciones 3.3 y 3.5), en un principio determinar por completo el comportamiento posterior del sistema.

La importancia crucial del caos es que proporciona una explicación alternativa para esta aparente aleatoriedad, el comportamiento caótico aparece en sistemas que son esencialmente libres de ruido y también son relativamente simples. [25]

3.2 CAOS EN LÁSERES DE ESTADO SÓLIDO [26]

Los láseres de estado sólido son buenas herramientas de prueba de la física fundamental de caos en sistemas láser. La frecuencia de oscilación de relajación de láseres de estado sólido está en el rango de kHz a MHz, muy inferior a la del láser semiconductor, cual se encuentra a unos GHz. La baja escala de tiempo



característica de los láseres de estado sólido permite fácilmente la detección experimental de formas de ondas temporales caóticas, sin necesidad de utilizar equipos de detección de alta velocidad. Desde el punto de vista dinámico, la dinámica de los láseres de estado sólido de modo único puede ser descrita por un modelo de láser de clase B para el campo eléctrico y la inversión de población. La dinámica de los láseres de estado sólido son relativamente simples en comparación con los láseres de semiconductor, porque no hay acoplamiento entre la amplitud del campo eléctrico y su fase óptica, cual es representado por el factor de anchura de línea de mejora o parámetro α en láseres semiconductores. Debido a estas características, muchos trabajos se han dedicado al estudio de la dinámica no lineal de los láseres de estado sólido, cosa que se describe en esta sección.

Los láseres de estado sólido que tienen una longitud de la cavidad pequeña (típicamente menos de un milímetro) son llamados específicamente láseres microchip. Debido a su corta longitud de la cavidad, la acción láser se produce en un solo modo o en unos pocos modos longitudinales. Es por lo tanto fácil de modelar la dinámica de láseres microchip con precisión. Uno de los modelos se llama Ecuación de Tang-Statz-deMars para describir la dinámica de láseres de estado sólido multimodo con el agujero ardiente espacial de la inversión de población.

3.2.1 Modulación externa

Láseres de estado sólido con modulación externa pueden generar intensidad de fluctuaciones caóticas. Salidas caóticas en láseres microchip se obtienen fácilmente mediante la modulación del sistema de bombeo (llamada modulación de bombeo) o pérdida de la cavidad láser (llamada modulación de pérdidas), lo que provoca una oscilación del orden de la frecuencia de oscilación de relajación alrededor de unos MHz.

Para la modulación de bombeo, un diodo láser se utiliza típicamente como una fuente de bombeo; para un láser de estado sólido. La inyección de corriente del diodo láser para el bombeo es modulada sinusoidalmente. La salida del diodo láser se enfoca sobre el cristal láser de estado sólido, y la inversión de población del láser de estado sólido es modulada sinusoidalmente. La interacción no lineal entre la frecuencia de oscilación de relajación y la frecuencia de modulación de bombeo



provoca fluctuaciones de intensidad caóticos. Ver figura 3.1 (izquierda) muestra los resultados experimentales de las formas de onda temporal de las intensidades de salida de un cristal de Ortovanadato de itrio dopado con neodimio (Nd: YVO₄) microchip láseres de estado sólido con diferentes amplitudes de modulación de bombeo. Diferentes formas de onda periódica se observan cuando se cambia la modulación de la amplitud. Se observa en general oscilación caótica a lo largo de la modulación de amplitud (figura 3.1a (izquierda)), y las oscilaciones se cambian a diferentes formas de onda periódicas y cuasiperiódicos cuando la amplitud de modulación se reduce. Por último, con período 1 de oscilación se observa para pequeñas amplitudes de modulación, como se muestra en la figura 3.1f (izquierda).

La figura 3.1 (derecha) muestra los resultados experimentales del diagrama de bifurcación como la amplitud de modulación aumenta o disminuye. Cuando la amplitud de modulación aumenta, período 1 de oscilación se cambia a período 6 de oscilación, una oscilación cuasi-periódica con un período 3 de oscilación, y una oscilación caótica. Una transición similar se observa cuando se disminuye la amplitud de modulación: Caos, oscilación cuasi-periódica con periodo de 3, período 6, período 2 y período 1 de oscilación sin embargo, el punto de bifurcación son diferentes de la caja cuando la amplitud de modulación aumenta (es decir, la histéresis). La histéresis de un diagrama de bifurcación se observa con frecuencia en muchos sistemas láseres dinámicos no lineales.

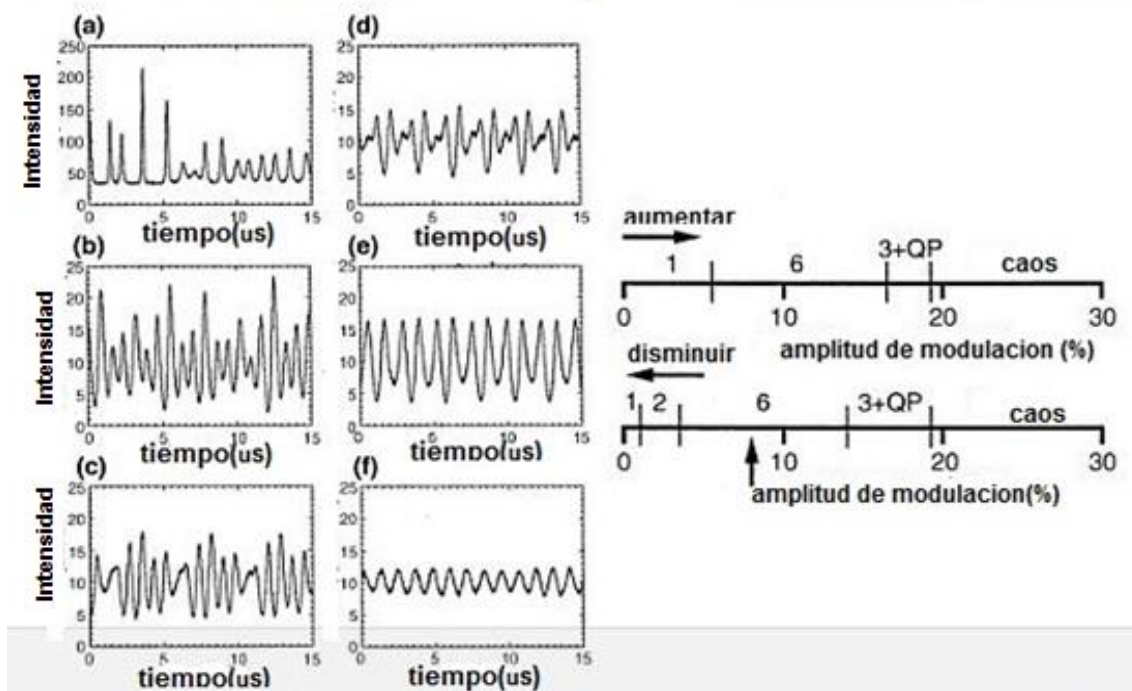


Figura 3.1 Resultados experimentales

Izquierda .Resultados experimentales de las formas de ondas temporales del láser de estado sólido Nd: YVO4 con la modulación de bombeo. La modulación se varía en (a) 21%, (b) 18%, (c) 11%, (d) 55%, (e) 1,4% y (f) 1,0%. La frecuencia de modulación se fija en 857 KHz. Las formas de onda temporales observados corresponden a él (a) el caos, (b) cuasi-periódica, (c) periodo de 6, (d) período de 6, (e) período de 2, y (f) período 1 de oscilaciones.

Derecha. Los resultados experimentales de diagramas de bifurcación del láser microchip de estado sólido Nd: YVO4 con modulación de bombeo como una función de la amplitud de modulación. Histéresis se ve cuando la amplitud de modulación aumenta o disminuye.



CAPITULO IV

METODOLOGIA DEL EXPERIMENTO

4.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el estudio del comportamiento de la dinámica del láser de estado sólido Nd: YVO₄ se utilizó un piezoeléctrico como retroalimentación al sistema para modular parámetros tales como la frecuencia en el piezoeléctrico y la modulación de la corriente de bombeo.

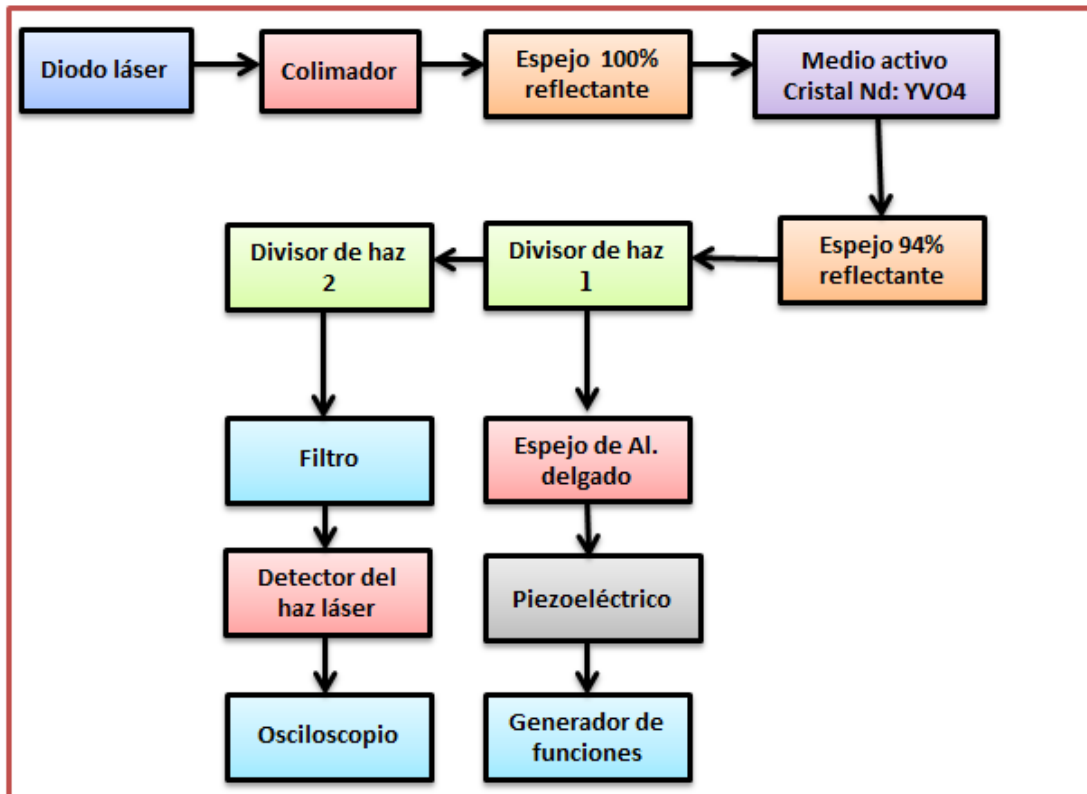


Figura 4.1 diagrama a bloques del experimento

De acuerdo al diagrama a bloques de la figura 4.1 para realizar el experimento primero montamos el colimador, espejo 100% reflectante, cristal Nd: YVO₄ y el espejo parcialmente reflectante en posicionadores angulares que le permitan mover los ángulos en la dirección vertical (v) y horizontal (h) en forma independiente para ayudarnos en la alineación, así mismo montamos los divisores de haz en otras monturas y los demás componentes para el experimento como se observa en el diagrama esquemático (ver figura 4.3).

- Alineación del eje óptico del láser

Para el bombeo óptico del láser utilizamos un diodo láser infrarrojo con salida de fibra óptica por lo tanto montamos la fibra óptica enfocando al medio activo (cristal Nd: YVO4) para poder excitarlo, producir inversión de población y como resultado acción laser para ello es necesario alinear todos los elementos ópticos de manera que el haz de luz recorra un mismo camino óptico, para la alineación hicimos uso de un láser de Helio-Neón como elemento auxiliar que nos permitió alinear los espejos de la cavidad óptica del láser así como los demás elementos del experimento mediante la superposición de las reflexiones del láser en los diferentes elementos ópticos.

Cuando los elementos ópticos intercalados están alineados con el eje definido por el haz láser (o sea sus superficies están ubicadas perpendiculares a la dirección de propagación de la luz), las respectivas reflexiones volverán sobre sí mismas, de lo contrario las reflexiones no se superpondrán con el haz láser de referencia (ver figura 4.2).

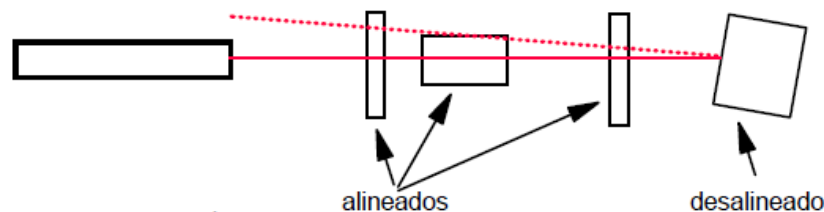


Figura 4.2 Alineación del eje óptico del láser

Una vez terminada la alineación del láser empezamos con el experimento:

La primera parte la realizamos de acuerdo al diagrama esquemático de la figura 4.3 empezamos a modular la corriente del diodo láser para ver el umbral de laseo y fue en 1.85 Amperes que es donde se logra ver que el láser empieza a oscilar, se hizo uso de gafas como seguridad del laboratorio de láseres y un visor de infrarrojos ya que el láser con el que se realiza el experimento no se puede ver a simple vista dado que está en el rango de longitud de onda del infrarrojo. [27,28]

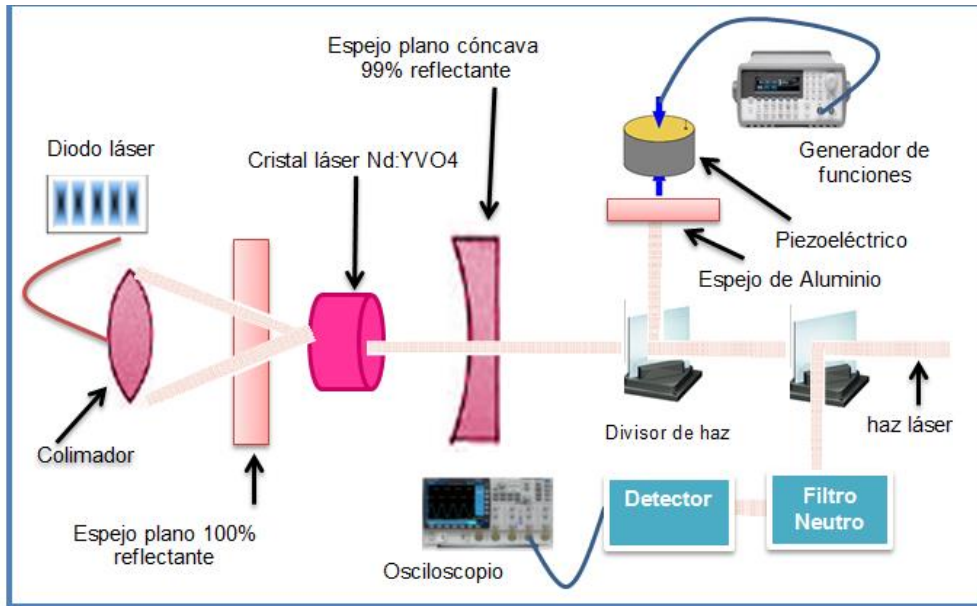


Figura.4.3 Diagrama esquemático del experimento parte 1

Posteriormente partir de que empezó a oscilar el láser, al salir el haz láser y al llegar al primer divisor de haz se divide una 50% el cual se concentra en el espejo acoplado al piezoeléctrico retroalimentando al sistema, el dispositivo piezoeléctrico va conectado a un generador de funciones; para poder modular la frecuencia y el voltaje del mismo, en el segundo divisor de haz colocamos el detector de haz láser con un filtro que solo permite pasar la luz IR bloqueando la luz visible evitando ruidos en el sistema conectado a un osciloscopio digital para poder visualizar la dinámica del láser y la producción de caos a partir de la modulación de la frecuencia y voltaje en el piezoeléctrico y modulando la corriente de bombeo del diodo láser.

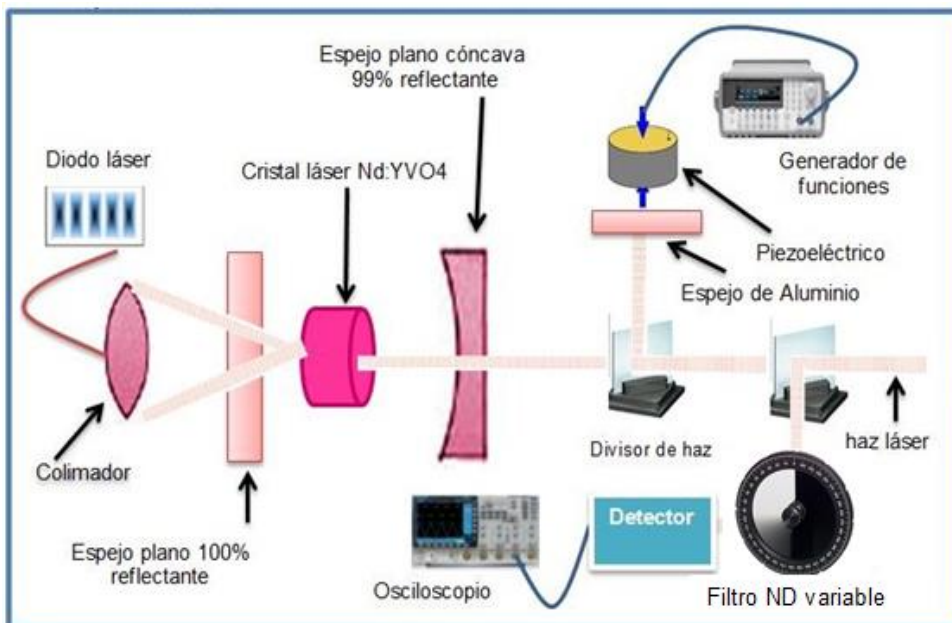


Figura.4.4 Diagrama esquemático del experimento parte 2

En la segunda parte del experimento colocamos un filtro de densidad neutra variable entre el segundo divisor de haz y el detector como se muestra en la figura 4.4, medimos la potencia de salida del láser y muestras del comportamiento del láser al ir variando los grados de atenuación del filtro desde 220° hasta 60° .

4.2 DESCRIPCION DE LOS DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Posicionadores angulares. Estas monturas para espejos (figura 4.5) están provistas con tornillos de paso fino que permiten un control muy exacto de los dos ángulos en forma independiente como se observa en la figura y ayuda en la alineación del láser.



Figura 4.5 Montura para espejos

Láser de Helio-Neón (ver figura 4.6). Pertenece a la familia de productos láser He-Ne rojo a una longitud de onda de 633 nm con una potencia que va desde 0,5 mW a 35 mW y lo empleamos para la alineación del láser. Dentro de sus otras aplicaciones se encuentra, metrología, medición de partículas, velocimetría y microscopía confocal.



Figura 4.6 Láser de Helio-Neón

Diodo láser (MODEL LDD1-1T-D, fabricado por ALPHALAS).El diodo láser (ver figura 4.7) nos sirvió como fuente de bombeo óptico, incluye su propio enfriador y su propio driver controlando los siguientes parámetros:

- Límite de corriente del diodo láser: es la corriente máxima a la que puede trabajar el diodo y es de 6 Amperes.

- Potencia del diodo láser: es la que determina la potencia del haz de luz láser emitida y es de 5 watts.

El diodo láser utilizado es infrarrojo con una longitud de onda de 700-1000 nm.



Figura 4.7 Diodo láser

Lente colimador .La colimación consiste en agrupar el haz de luz dispersa en una misma trayectoria (ver figura 4.8). El objetivo de la colimación es hacer que el eje óptico de cada lente o espejo coincida con el rayo central del sistema. En el experimento fue de gran utilidad ya que el haz de luz emitido por la fibra óptica del diodo láser pasa por el colimador y al tener un haz de luz concentrada en una misma trayectoria esta se enfoca al espejo totalmente reflectante de la cavidad óptica del láser.[29]

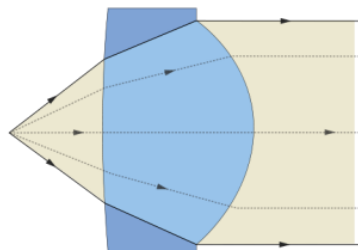


Figura 4.8 Colimador óptico

Resonadores y elemento de ganancia. Como ya se ha mencionado en apartados anteriores estos elementos son los que conforman nuestro láser. En el experimento al llegar la energía de bombeo al primer espejo de la cavidad óptica del láser, este choca con el elemento de ganancia (Nd: YVO_4) de tal forma que al excitarlo sus electrones se ubican en un nivel mayor de energía creando así una inversión de población, posteriormente los electrones excitados caerán a un nivel bajo de energía y en este proceso (emisión espontánea) cada uno emitirá un fotón de forma aleatoria, después si uno de estos fotones encuentra en su camino a un electrón

excitado, este fotón logrará que el electrón respectivamente decaiga en su nivel de energía produciendo de esta forma un nuevo fotón el cual presenta las mismas características al primero a este proceso se le llama emisión estimulada, posteriormente los fotones se moverán en ambas direcciones chocando con el espejo parcialmente reflector de manera que algunos fotones logran salir creando así oscilación laser.

Detector (MODEL EK-DPS, fabricado por MONOCHROM) **y filtros neutros.** El detector se muestra en la figura 4.9, su función es convertir la señal óptica en una señal eléctrica, detectando el haz del láser y envía las señales para analizarlas en un osciloscopio.

En la figura 4.9 se observa el filtro antes del detector ya que su función de este filtro neutro es bloquear la luz visible dejando pasar solo el infrarrojo que sería solo el haz láser, evitando así obtener señales con mucho ruido.



Figura 4.9 Detector y filtros

Osciloscopio (MODEL GDS 1151 A-U, fabricado por G-WINSTEK). El osciloscopio utilizado en el experimento se muestra en la figura 4.10. En el osciloscopio visualizamos las señales adquiridas del detector del haz láser, posteriormente grabamos todas las muestras en una memoria USB para luego procesar los datos en MATLAB u OriginPro.

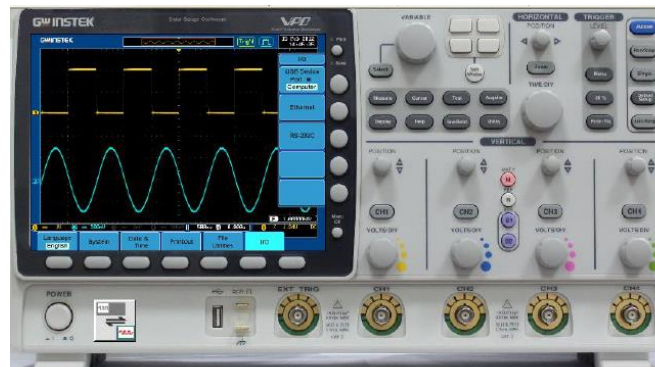


Figura 4.10 Osciloscopio

Generador de funciones (MODEL BX PRECISION). Este generador de funciones (ver figura 4.11) genera diferentes tipos de señales como TTL, rampa, sinusoidales etc., con una frecuencia máxima de 21.5 MHz. En nuestro experimento nos fue útil para el piezoeléctrico aplicándole una señal sinusoidal; con un voltaje de 5 Vpp e ir modulando la frecuencia para obtener significantes vibraciones en el piezoeléctrico.



Figura 4.11 Generador de funciones

Divisores de haz (beamsplitter 50/50). Los divisores de haz (ver figura 4.12) son componentes ópticos utilizados para dividir la transmisión de un haz óptico de entrada en dos partes separadas, son componentes comunes de los sistemas de láser. Este es un excelente instrumento para ajustes precisos de espectrofotómetros, monocromadores, láseres. La luz puede ser dividida por el porcentaje de intensidad global, longitud de onda, o estado de polarización. [30]



Figura 4.12 Divisor de haz 50/50

Mesa holográfica (MODEL RS100 fabricado por NEWPORT). Es un sistema de control de vibraciones (VCS) de Newport Integrity™ fue diseñado específicamente para soportar aplicaciones básicas de investigación y desarrollo óptico en laboratorios corporativos. Sistemas de Control de Vibración (VCS) de la serie Integrity se componen de dos componentes: Una superficie de trabajo de acero inoxidable amortiguado y, o bien los aisladores rígidos o neumáticos con válvulas de nivelación automáticos integrados en un nuevo diseño de marco para ofrecer una plataforma de aislamiento. En esta mesa holográfica fue montado el experimento (ver figura 4.13). [31]



Figura 4.13 Mesa holográfica

Gafas de seguridad láser (marca Kentek). Toda persona que trabaje con un equipo láser ha de ir debidamente protegida con las gafas adecuadas para cada aplicación. Para este caso utilizamos con las siguientes especificaciones OD (densidad óptica +@700-1200 nm) ya que se trabajó con un láser infrarrojo y se muestra en la figura 4.14.



Figura 4.14 Gafas de seguridad láser

Filtro de densidad neutra variable (fabricado por Edmund Optics). Estos filtros de densidad neutra (ver figura 4.15) son continuamente variable en los 270° del filtro. Los filtros variables circulares proporcionan atenuación lineal de la luz incidente girando el filtro. [32]



Figura 4.15 Filtro de densidad neutra

Medidor de potencia de láser (MODEL NOVA display). Los medidores de potencia de láser (ver figura 4.16) utilizan un sensor de termopila, la luz del láser calienta el sensor de termopila y el diferencial de temperatura entre la temperatura ambiente y la superficie de la termopila genera una tensión de salida, los sensores de termopila tienen una respuesta lenta, pero pueden manejar altos niveles de potencia láser. Esto las hace ideales para la medición de la potencia media de láser de onda continua o pulsada. [33]



Figura 4.16 Medidor de potencia

Visor de infrarrojo (ElectroViewer 7215). Este visor de infrarrojos de mano (ver figura 4.17) está diseñado para cumplir con los requisitos de la visualización en el corto rango de longitudes de onda de infrarrojos. Para nuestro experimento nos fue útil ya que trabajamos con infrarrojo. [34]



Figura 4.17 Visor de infrarrojo

Transductor piezoeléctrico (ver figura 4.18). Basan su funcionamiento en el fenómeno de la piezoelectricidad es decir cuando los cristales que adquieren carga eléctrica se comprimen, retuercen o distorsionan, se dicen que son piezoeléctricos. Para nuestro experimento nos fue útil ya que colocamos un espejo al piezoeléctrico alineado con el divisor de haz, así que una mitad del haz láser llegaba al piezoeléctrico retroalimentando al sistema mediante el espejo, para el funcionamiento del piezoeléctrico lo conectamos a un generador de funciones con un voltaje de 5 Vpp y modulamos la frecuencia para ver en el osciloscopio la dinámica que producía en nuestro laser al ir comprimiéndose significativamente. [35]

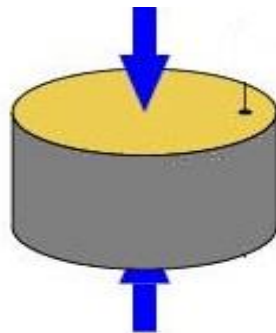


Figura 4.18 Transductor piezoeléctrico

4. 3 RESULTADOS

4.3.1 Umbral de la potencia de bombeo.

El umbral de la potencia de bombeo es el valor de la potencia a la que se alcanza el umbral del láser, asumiendo condiciones de estado estacionario. En este punto, la ganancia es muy pequeña debido a las pérdidas del resonador láser. En la gráfica siguiente podemos observar que a los 0,3 Amperes se alcanza el umbral del láser (ver figura 4.19), es decir, cuando la emisión del láser comienza a ocurrir; el cual lo observamos con el visor de infrarrojo cuando el láser empezó a oscilar. De acuerdo a los datos podemos comprobar que de acuerdo a las características del cristal Nd:YVO₄ mencionado en el marco teórico; si se logró obtener un umbral de laseo bajo debido a que el cristal tiene una eficiencia del bombeo óptico mayor al 60 % .

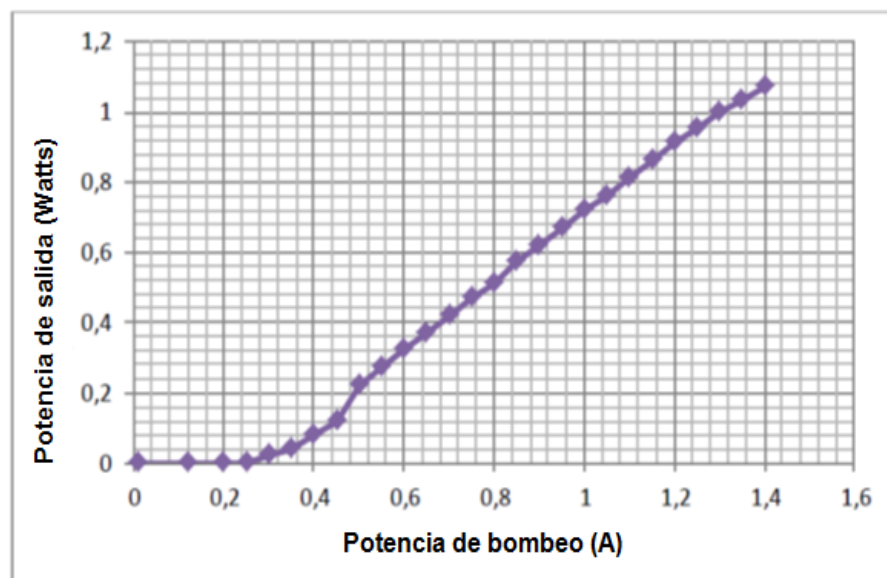


Figura 4.19 Umbral de la potencia de bombeo

4.3.2 Láser sin retroalimentación y modulación de parámetros

Posteriormente de alcanzar el umbral láser; medimos la potencia de salida del láser, en el primer divisor de haz y en el segundo divisor para ver las pérdidas. En la tabla 4.1 podemos observar que la potencia de salida del láser a los 3 Amperes es de 91,2 mW por lo que en el primer divisor de haz se pierde casi la mitad de la potencia ya que es un divisor de 50/50, es decir, divide la potencia a la mitad y en el segundo divisor de haz existe una pérdida del 43.3 % de la potencia del láser, sin embargo con la desventaja de que hay pérdidas en la potencia de salida del láser nos fue útil

utilizas estos divisores de haz para poder retroalimentar al sistema y adquirir muestras.

Tabla 4.1 Potencias de salida del láser

corriente(A) de bombeo	Potencia láser(mW)	Potencia 1ª divisor de haz(mW)	Potencia 2º divisor de haz(mW)
1,85	10,595	5,52	4,155
2	21,265	10,71	8,8
2,5	60,7	31,73	24,905
3	91,2	50,45	39,95

Primeramente tomamos una muestra del láser sin modular ningún parámetro y sin retroalimentar al sistema, la gráfica se muestra a continuación: podemos observar que cuando el diodo láser (sistema de bombeo) es de repente encendido y por fluctuaciones de la potencia de bombeo; su potencia de salida no inmediatamente vuelve a su estado de equilibrio, antes de que se alcance el estado estacionario, el láser emite un número de picos y se somete a oscilaciones de relajación (ver figura 4.20).

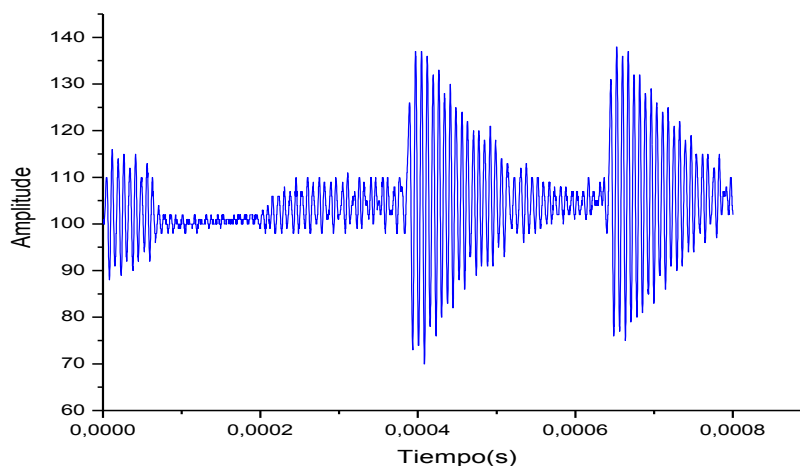


Figura 4.20 Láser sin modulación



4.3.3 Modulación de parámetros de la dinámica del láser Nd: YVO₄

Para el estudio de la dinámica del láser de estado sólido Nd: YVO₄ sujeto a modulación de parámetros, se modularon los siguientes parámetros.

- Modulación de la frecuencia en el piezoeléctrico que sirvió como retroalimentación al sistema desde 1 KHz hasta 60 KHz y de 1 KHz hasta 100 KHz con una potencia de bombeo de 1.95 A.
- Modulación del voltaje en el piezoeléctrico 0 Vpp – 6 Vpp.
- Modulación de la potencia de bombeo desde 1.45 Amperes hasta 1.95 Amperes a una frecuencia de 10 KHz y desde 1.45 Amperes hasta 2.5 Amperes a una frecuencia de 17 KHz.
- Modulación de la atenuación del filtro de densidad variable neutra desde 220° hasta 70° a una frecuencia de 17 KHz y 1.95 A. de potencia de bombeo.

Para la modulación de la frecuencia se tomaron varias muestras ya que se fue modulando en intervalos de 1 KHz, dado que serían muchas gráficas, se procesaron los datos en matlab obteniendo un diagrama de bifurcación como se muestra en la figura 4.20 y 4.21 con el fin de analizar en qué frecuencias existe irregularidades en el sistema provocando dinámica caótica. Si observamos ambas gráficas nos podemos dar cuenta que en ambas gráficas aproximadamente a los 10 KHz empieza a aumentar la intensidad de picos y a los 17 KHz existe una intensidad de pico mayor y que a los 28 KHz vuelve a decaer tratando de estabilizarse, por lo tanto en esas frecuencias nos enfocamos a estudiar la dinámica del láser Nd: YVO₄.

Diagramas de bifurcación: modulación de frecuencias.

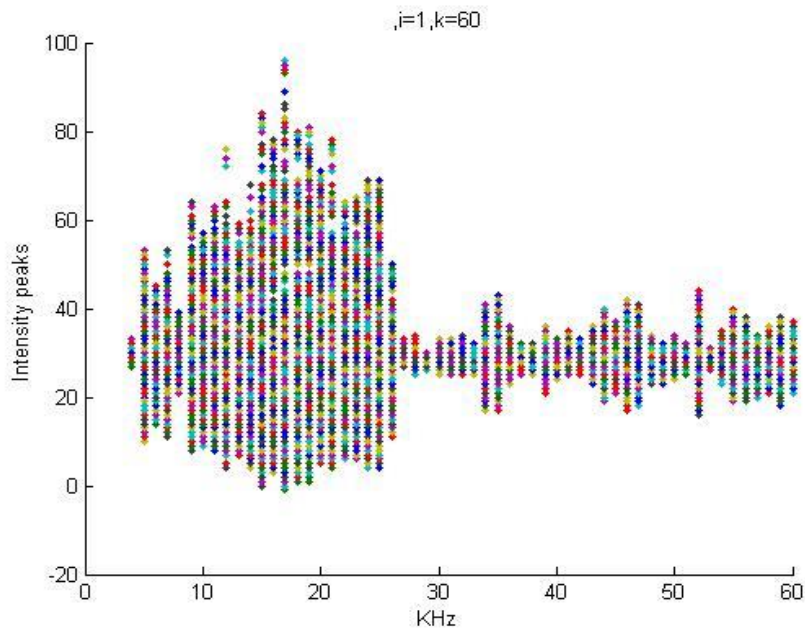


Figura 4.21 Diagrama de bifurcación (1KHz- 60 KHz) a 1.95 A.

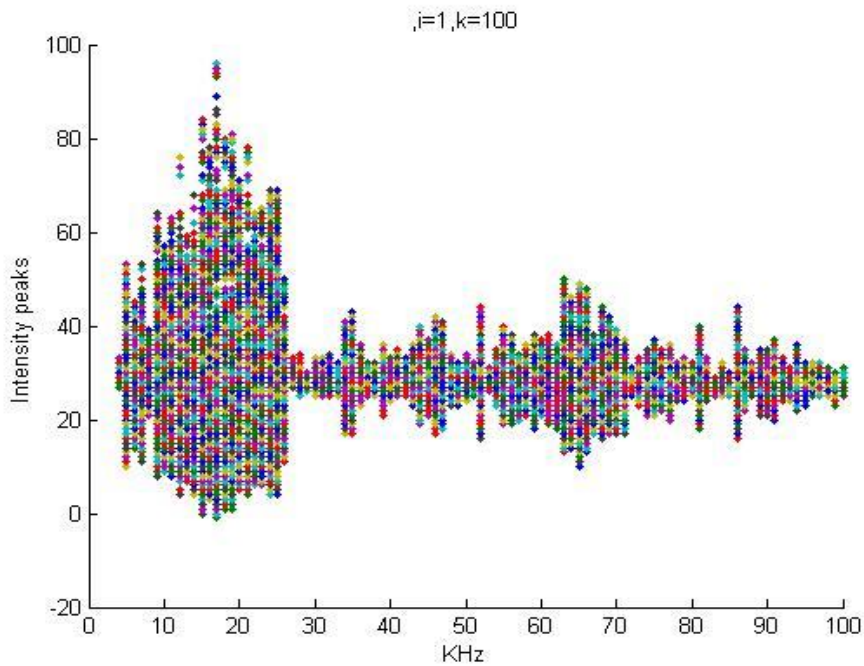
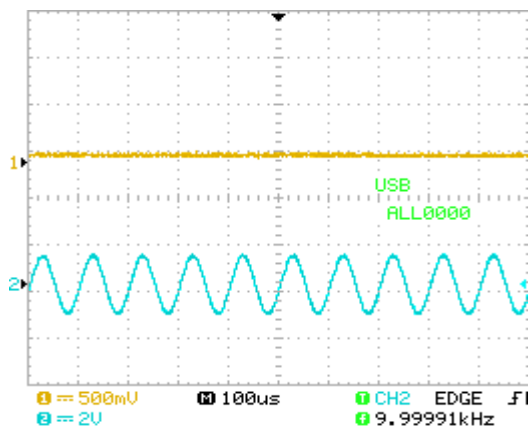


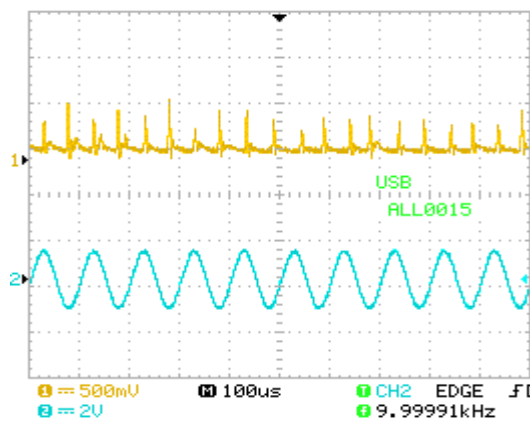
Figura 4.22 Diagrama de bifurcación (1KHz- 100 KHz) a 1.95 A.

De acuerdo a los resultados anteriores tomamos esas frecuencias para estudiarlo modulando la potencia de bombeo del diodo láser.

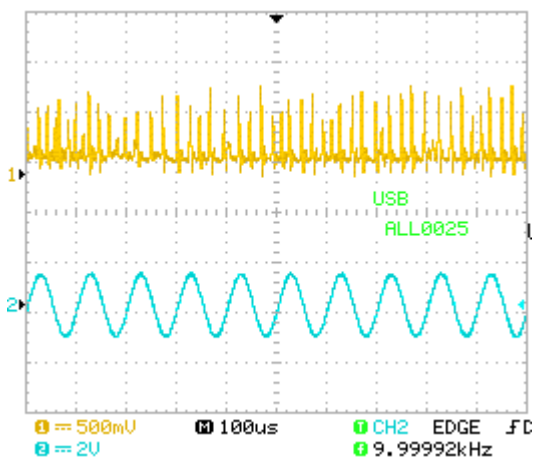
Gráficas de la modulación de la potencia de bombeo: 1.45 Amperes - 1.95 Amperes a una frecuencia de 10 KHz.



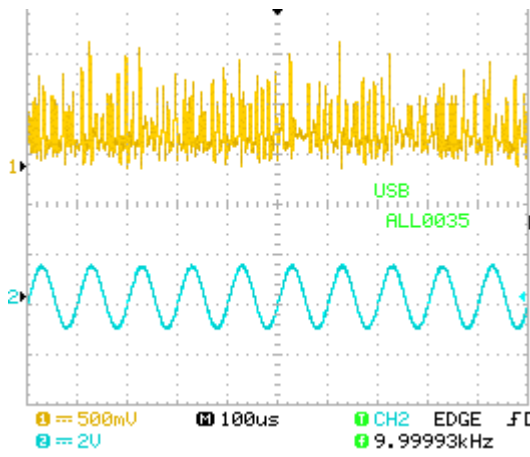
a) 1.45 Amperes



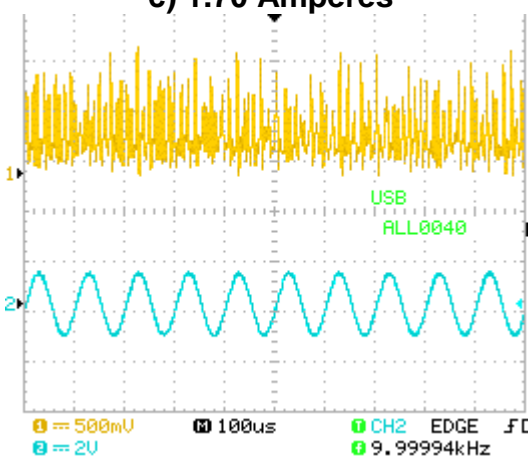
b) 1.60 Amperes



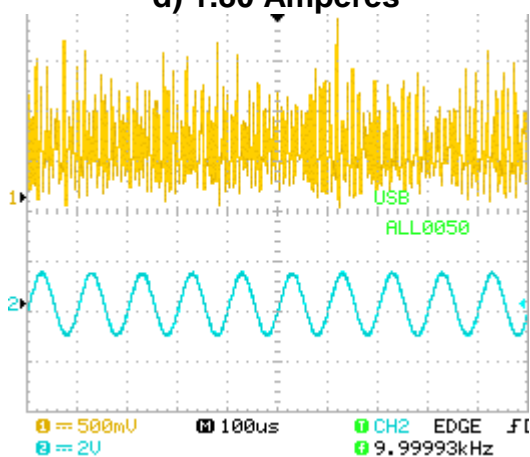
c) 1.70 Amperes



d) 1.80 Amperes



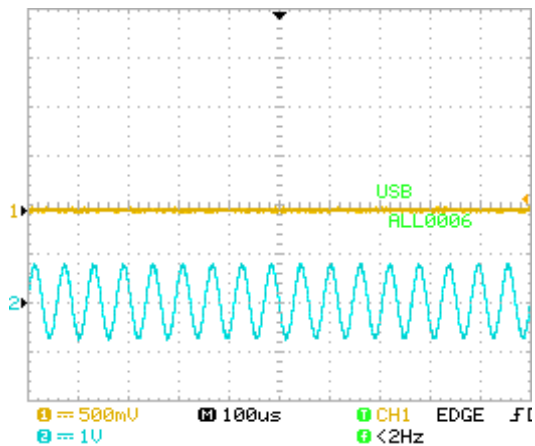
e) 1.85 Amperes



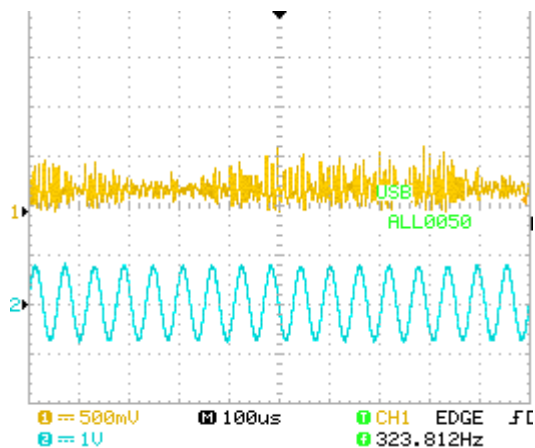
f) 1.95 Amperes

Figura 4.23 Modulación potencia de bombeo 1.45 A.-1.95 A. a 10 KHz

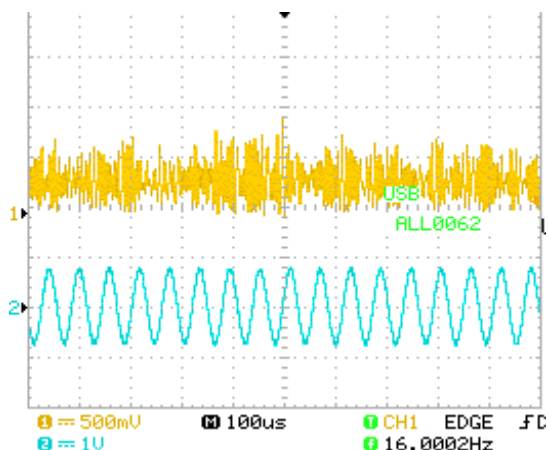
Gráficas de la modulación de la potencia de bombeo: 1.45 Amperes - 1.95 Amperes a una frecuencia de 17 KHz.



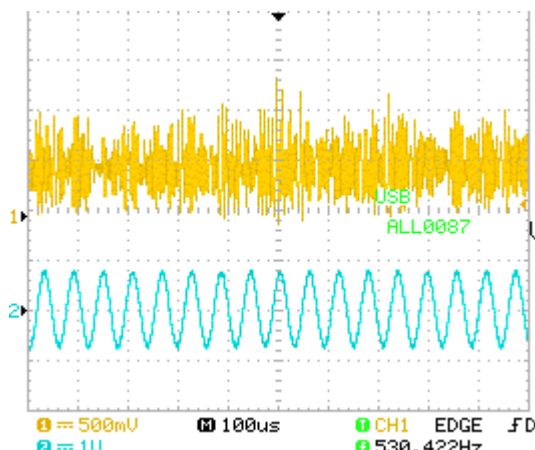
a) 1.45 Amperes



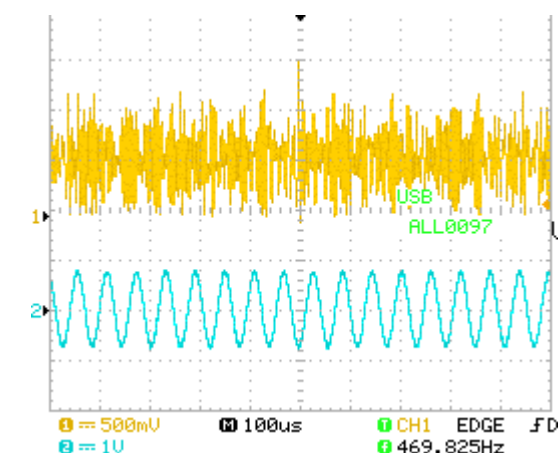
b) 1.60 Amperes



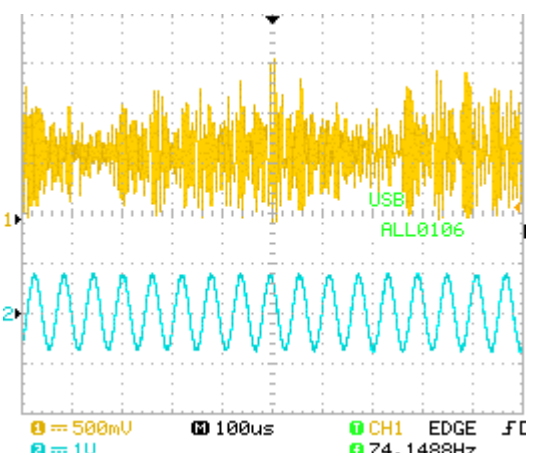
c) 1.70 Amperes



d) 1.80 Amperes



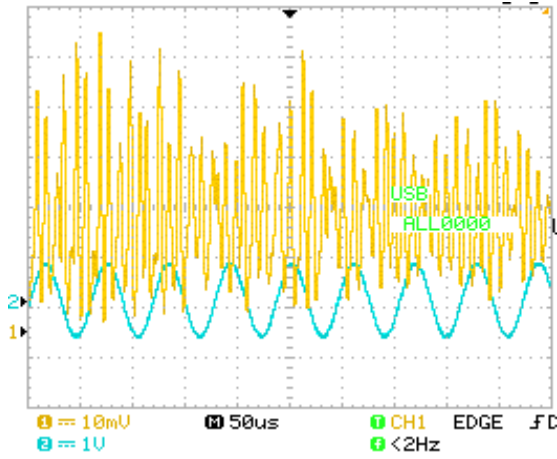
e) 1.85 Amperes



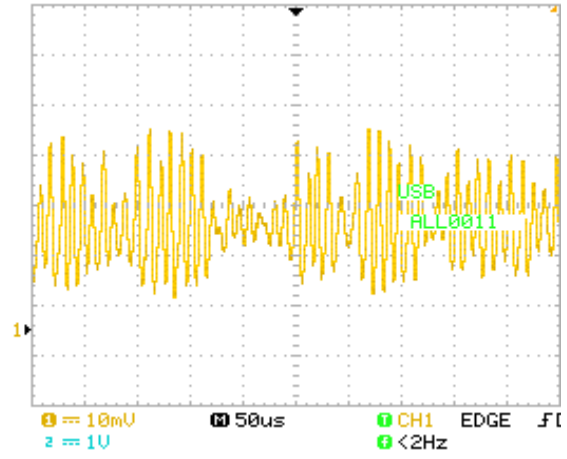
f) 1.95 Amperes

Figura 4.24 Modulación de potencia de bombeo 1.45 Amperes.-1.95 Amperes a 17 KHz

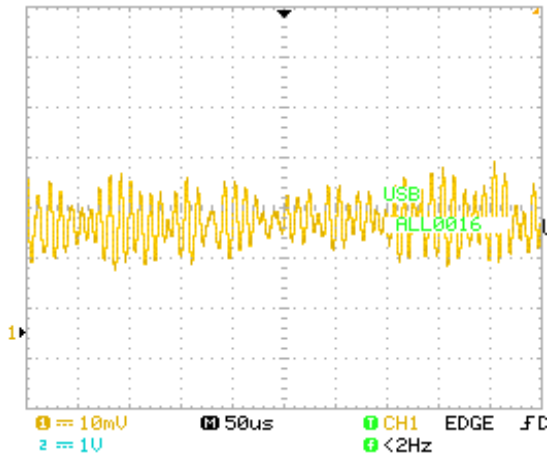
Gráficas de la modulación de la atenuación del filtro de densidad neutra variable.



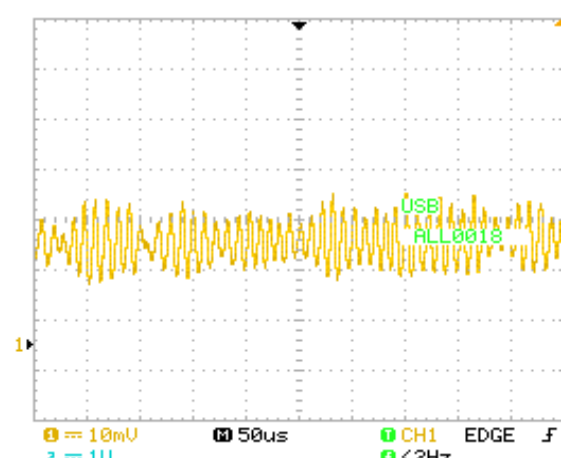
a) 220°



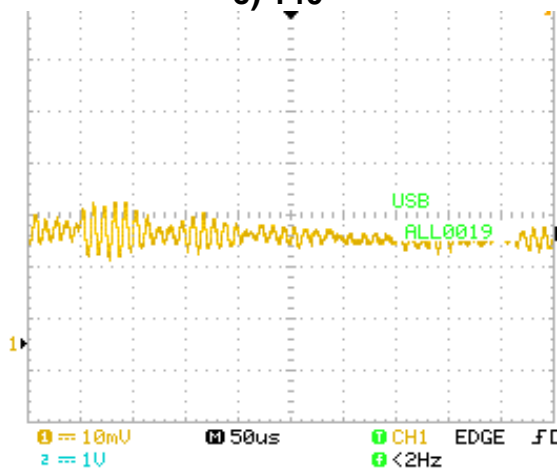
b) 165°



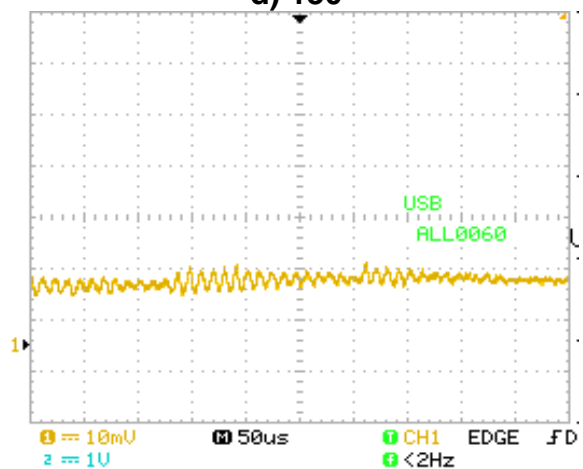
c) 140°



d) 130°



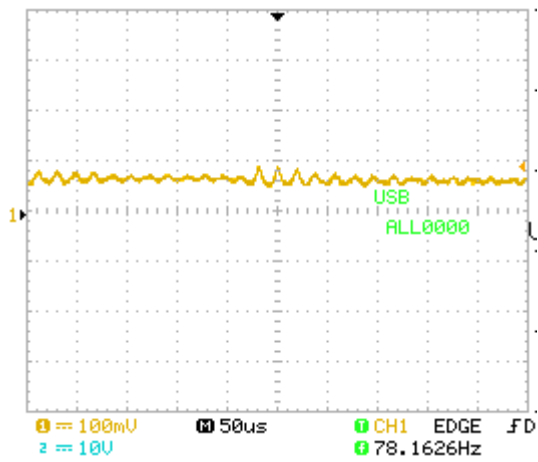
e) 125°



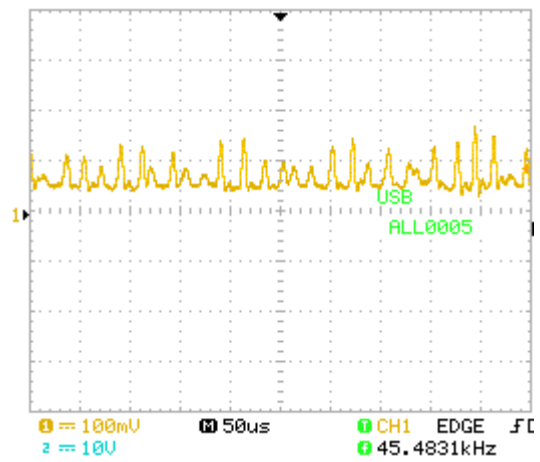
f) 70°

Figura 4.25 Modulación de la atenuación del filtro

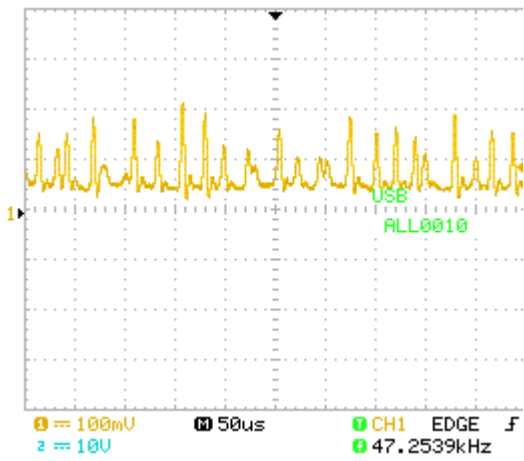
Gráficas de la modulación del voltaje en el piezoeléctrico.



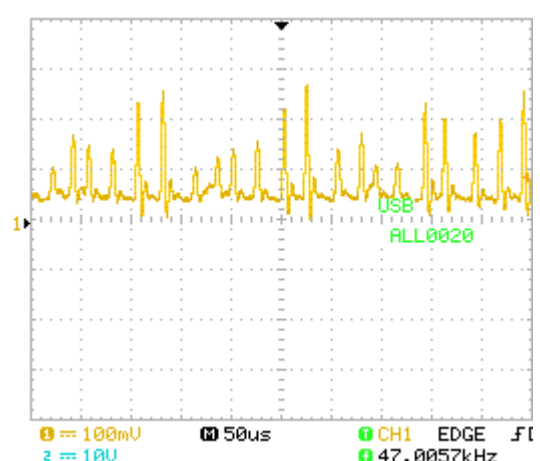
a) 0 Vpp



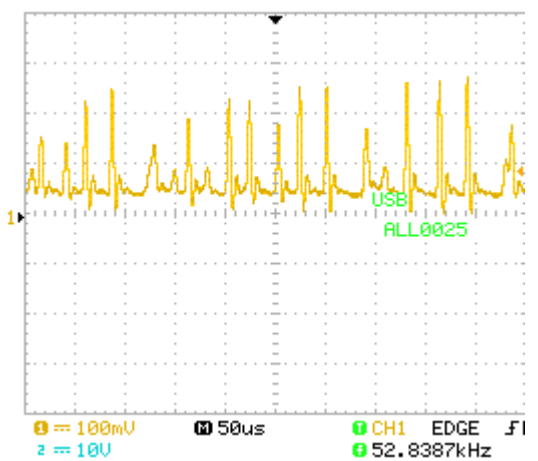
b) 1 Vpp



c) 2 Vpp



d) 3 Vpp



e) 4 Vpp



f) 6 Vpp

Figura 4.26 Modulación del voltaje en el piezoeléctrico



De acuerdo a la figura 4.23 observamos en el a) umbral de laseo (aun empieza a oscilar el láser) a partir del b) se empieza a notar irregularidades en los picos de intensidad de la gráfica haciéndose notar cada vez mayor al aumentar la potencia de bombeo hasta llegar a 1.95 A, podemos observar en la gráfica f) dinámica no lineal en el láser esto es debido al fenómeno del caos y otra de las características de la dinámica no lineal es que es sensible a las condiciones iniciales, por lo que observamos una señal aparentemente ruidosa y aleatoria. De igual manera sucede en la figura 4.24 a diferencia que se trabajó a una frecuencia de 17 KHz y la dinámica es más caótica.

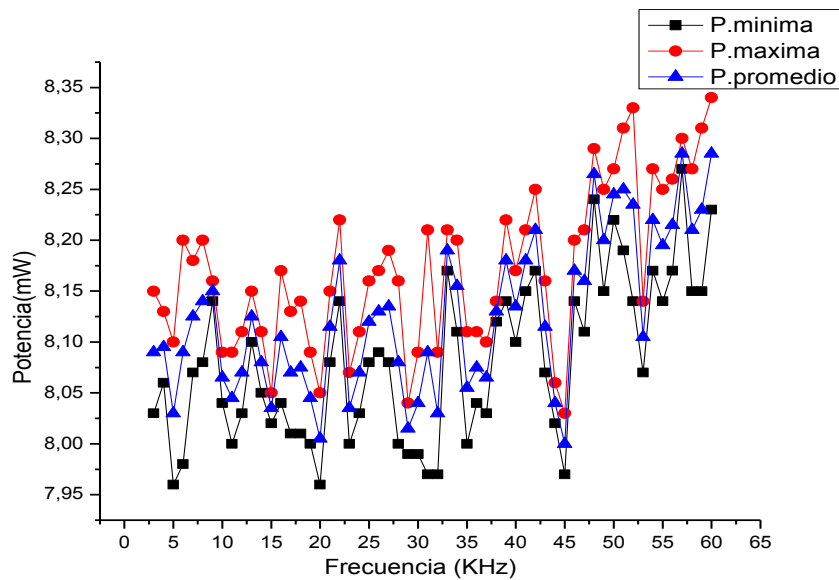
En la figura 4.25 al modular la atenuación del filtro de densidad variable se puede apreciar que al 220° existe dinámica en el láser pero al ir modulando la atenuación de la señal de retroalimentación la dinámica va decayendo hasta observar solo la señal del láser sin retroalimentación. Finalmente modulamos el voltaje en el piezoeléctrico donde también podemos apreciar señales menos caóticas ya que se puede observar menor irregularidades en las oscilaciones.

A continuación se presentan las gráficas de las potencias medidas de láser Nd: YVO₄ cuando se modularon los parámetros anteriores.

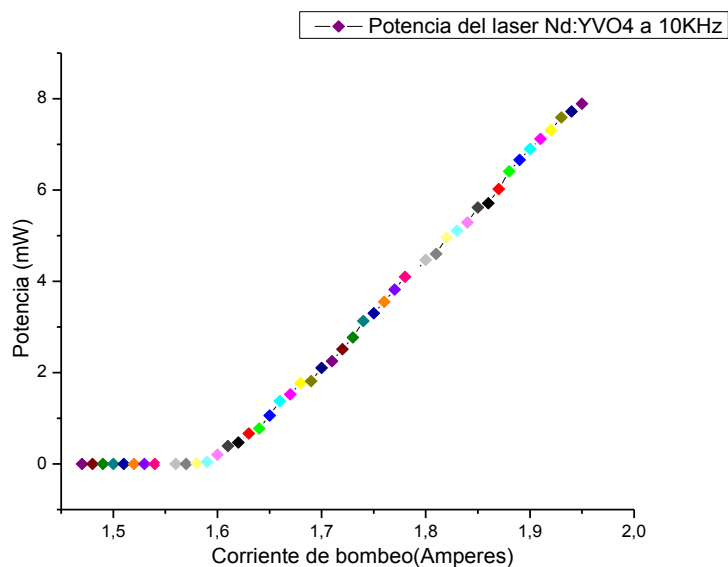
En el a) se puede observar inestabilidades en la potencia de salida del láser debido al caos producido por la modulación de la frecuencia y la retroalimentación del sistema por vibraciones significativas del piezoeléctrico. En el b) y d) se observa estable la salida de potencia del láser y finalmente en el c) se observa que la potencia va decreciendo debido a que se utilizó un filtro de densidad variable al ir modulando la atenuación de la señal de retroalimentación la dinámica va decayendo hasta observar solo la señal del láser sin retroalimentación.

4.3.4 Gráficas de la potencia del láser Nd: YVO₄ a partir de la modulación de parámetros.

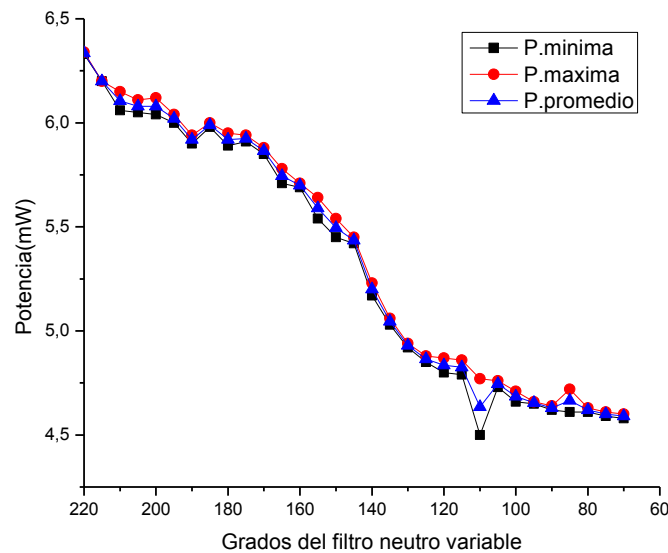
a) La siguiente grafica muestra la potencia del láser al modular la frecuencia en el piezoeléctrico desde 1KHz hasta 60 KHz.



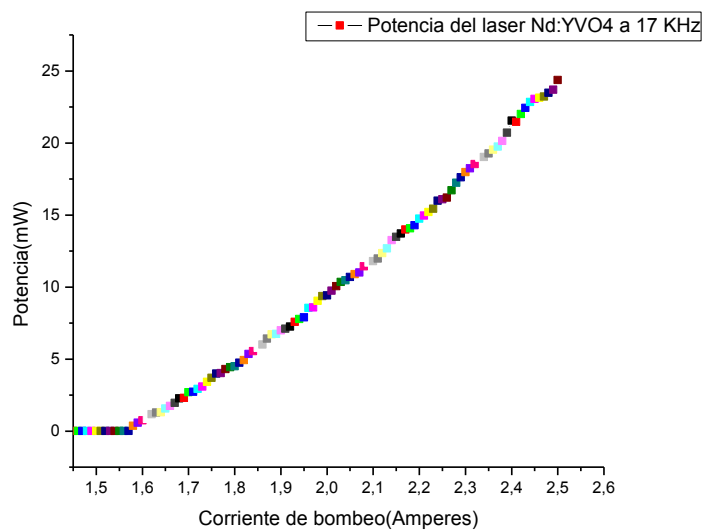
b) La gráfica muestra la potencia del láser modulando la potencia de bombeo del diodo láser desde 1.45 Amperes hasta 1.95 Amperes a una frecuencia fija de 10 KHz



c) La siguiente grafica muestra el comportamiento del láser utilizando un filtro de densidad neutra variable, se fue atenuando la señal variando los grados del filtro desde 220° hasta 70° en intervalos de 5°, a una frecuencia de 17 KHz y potencia de bombeo a 1.95 Amperes.



d) La gráfica muestra la potencia del láser modulando la corriente de bombeo del diodo láser desde 1.45 Amperes hasta 2.5 Amperes a una frecuencia fija de 17KHz.





CONCLUSIÓN

De acuerdo a los objetivos planteados para el experimento se obtuvieron resultados satisfactorios. Al trabajar con el cristal Nd: YVO4 que está convirtiéndose en uno de los láseres de estado sólido más importantes reemplazando al Nd: YAG; debido a su alto coeficiente de absorción y gran absorción a la longitud de onda del bombeo óptico, logramos obtener un umbral de laseo lo que significa que hubo pocas pérdidas en el resonador óptico y mayor eficiencia de ganancia. Así mismo al emplear el diodo láser como fuente de bombeo óptico logro que sea más eficiente la excitación del elemento de ganancia (Nd: YVO4)

Al modular la frecuencia y de acuerdo a los diagramas de bifurcación se observó que a los 10 KHz se empezaba a observar dinámica caótica y a partir de los 17 KHz existía mayor dinámica y luego la dinámica volvía a decaer como se aprecia en el diagrama. Tomando como referencia en las frecuencias que se observaron dinámica, se procedió a modular los siguientes parámetros: potencia de bombeo del diodo láser, el voltaje en el piezoeléctrico y la atenuación del filtro de densidad neutra variable, observando dinámica no lineal en distintos regímenes.

Cabe destacar que se observó más caos en frecuencias fijas de 17 y 10 KHz al modular la potencia de bombeo del diodo láser.



RECOMENDACIONES

Adquirir más equipos de instrumentación que faltan en el laboratorio para hacer diferentes pruebas y mediciones en el experimento, cambiar equipos que ya se encuentran obsoletos por equipos nuevos y actualizados que puedan lograr que el experimento sea más eficiente. Implementar un sistema de monitoreo automático con los nuevos equipos que posee el laboratorio, para realizar barrido de frecuencias y así mismo modular diferentes parámetros de forma automatizada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Yariv, "*Quantum Electronics*", 4th ed. (Wiley, New York), 1991.
- [2] <http://www.cio.mx/>
- [3] Koechner W., Bass M. "*Solid-State Lasers Engineering*" (Springer 1998).
- [4] <http://www.rp-photonics.com/lasers.html>
- [5] P.A. Franken, A.E. Hill, C.W. Peters, and G. Weinreich: Phys. Rev. Lett. 7, 118 (1961).
- [6] N. Bloembergen: *Nonlinear Optics*(Benjamin, New York), 1965.
- [7] F. Zernike and J.E. Midwinter: *Applied Nonlinear Optics*(Wiley, New York), 1973.
- [8] A.E. Siegman, "*Lasers*", University Science Books, Mill Valley, CA, 1986.
- [9] http://www.csir.co.za/lasers/basics_of_lasers.html
- [10] <http://mx.tuhistory.com/zona-de-tecnologia/ciencia/resonador-optico.html>
- [11] M. Young, *Optics & Lasers*, Springer, 2000.
- [12] Tur Terrasa J., "*Tecnología y practica del láser*", Marcombo Boixareu Editores, Barcelona-México, 1987.
- [13] Samuel L Marshall, "*Láser: Tecnología y Aplicaciones*", Editorial Reverté, México, 1972.
- [14] Robert A., "*Laser security*", Center for Devices and Radiological Health, Estados Unidos, 2006.
- [15] Scheps R., "*Introduction to Laser Diode-Pumped Solid State Lasers*", Editorial Spie Press. Bellingham, Washington USA, 2002.
- [16] T.Y Fan "*Diode-Pumped Solid State Lasers*" The Lincoln Laboratory Journal, volume 3, 1990.
- [17] R.C. Eckardt, H. Masuda, Y.L. Fan, and R.X. Byer: IEEE J. Quantum Electron. QE-26, 922 (1990)
- [18] http://www.rp-photonics.com/laser_resonators.html



- [19] William T. Silfvast, “*Laser fundamentals*”, second edition, Cambridge University Press, 2004.
- [20] N.F. Nye: *Physical Properties of Crystals*(Clarendon, Oxford), 1960.
- [21] <https://www.coherent.com/download/628/Nd-YVO4-Data-Sheet.pdf>
- [22] Hilborn, R.C., “*Chaos and Nonlinear Dynamics. An Introduction for Scientists and Engineers*” (Oxford University Press, Oxford, 2000).
- [23] R.W. Boyd: *Nonlinear Optics*(Academic, San Diego, CA), 1992.
- [24] R.L. Sutherland: *Handbook of Nonlinear Optics*(Dekker, New York), 1996.
- [25] D.L. Mills:*Nonlinear Optics*, 2nd ed. (Springer, Berlin), 1998
- [26] Atsushi Uchida, “*Optical Communication with Chaotic Lasers: Applications of Nonlinear Dynamics and Synchronization*”, (Oxford University Press, Oxford, 2000).
- [27] *Optical processes in Semiconductors*. J. Pankove. Dover Public. Inc. 1975
- [28] *Láser electronics*. J. Verdeyen. Prentice Hall , 1995
- [29] <http://es.wikipedia.org/wiki/Colimador>
- [30] <http://www.edmundoptics.com/optics/beamsplitters/>
- [31] <http://www.newport.com/Integrity-VCS-Vibration-Control-System/987529/1033/info.aspx>
- [32] <http://www.edmundoptics.es/optics/optical-filters/neutral-density-filters/circular-variable-filters/1495>
- [33] http://www.directindustry.es/prod/ophir-optronics/aparatos-medicion-potencia-d-energia-optica-12595-440630.html#product-item_1352699
- [34] http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Kameras_und_Zubehoer/NIR-Kameras/Documents/PH_OS_EPC_SofEC-ElectroViewer7215-v12.pdf
- [35] http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_piezoel%C3%A9ctrico