

# LABORATORIO 5

## Departamento de Física - UBA

### Láser de Nd:YAG. Cavidades de oscilación- Modos transversales

#### Introducción

En esta práctica se estudiarán las condiciones de estabilidad en cavidades resonantes y las características principales de un láser de Nd YAG.

Un láser está compuesto por tres componentes básicos: un mecanismo de bombeo, un medio amplificador y un medio de realimentación. El mecanismo de bombeo puede ser muy variado (excitación con un haz de electrones, mediante luz coherente -otro láser- o luz incoherente -una lámpara de destello-, mediante una reacción química, etc.). El bombeo es la forma que tiene el sistema de recibir la energía necesaria para sostener la emisión láser. El segundo componente primordial de un láser es el medio activo o medio amplificador. Este puede ser un medio sólido (cristalino o amorfo), un líquido o un plasma. El amplificador o medio activo es el que recibe la energía del bombeo y la “transfiere” al haz láser que genera. El último elemento con que cuentan la mayoría de los láseres que existen es un mecanismo para realimentar la radiación (luz) emitida por el amplificador permitiendo de esta manera que el láser adquiera sus características distintivas, que son su gran colimación, alta coherencia y gran brillo. En el caso de luz, la realimentación se logra mediante espejos que re-inyectan una parte de la señal nuevamente en el amplificador de luz.

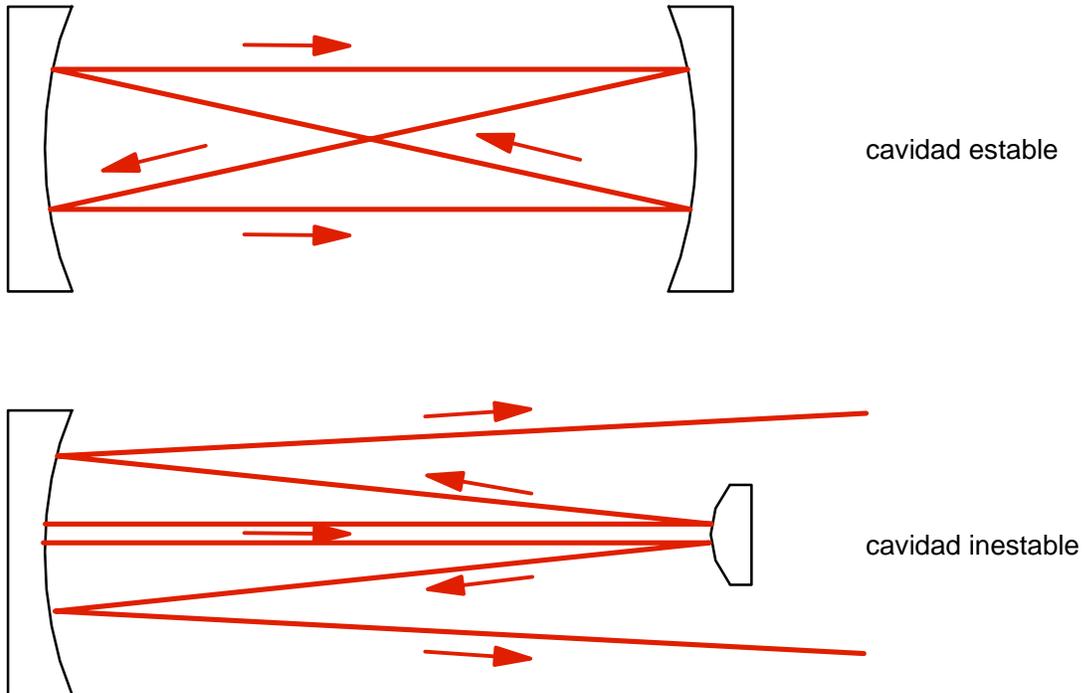
Una cavidad resonante consiste en dos o más espejos alineados de manera tal que la luz emitida por el amplificador se refleja sobre sí misma recorriendo el mismo camino óptico muchas veces. Se coloca uno de los espejos de la cavidad resonante de manera que tenga una reflectividad menor que el 100%, de tal manera que parte de la luz que está oscilando salga de la cavidad produciendo un haz colimado que es lo que podemos medir como salida de nuestro láser.

Podemos armar diferentes cavidades resonantes, cambiando la configuración de las mismas al variar la distancia entre espejos y los radios de curvatura de los mismos. En base a estas configuraciones, las cavidades resonantes se dividen en dos grandes grupos: cavidades estables y cavidades inestables. Las primeras tienen la particularidad de que la distribución de intensidades dentro de la cavidad no se modifica en los sucesivos pasajes de la luz a través de la cavidad. En las cavidades inestables el haz va divergiendo progresivamente y realiza pocos pasajes por el amplificador.

Las cavidades estables son las más comunes y se usan en todos los láseres que funcionan en forma continua. Las cavidades inestables son particularmente útiles en láseres que funcionan en forma pulsada con medios amplificadores de gran ganancia. Un ejemplo indicativo de

cavidades estables e inestables junto con un posible trazado de rayos por la cavidad puede verse en el diagrama de la figura a continuación.

- *Enumere características de cavidades estables e inestables*



---

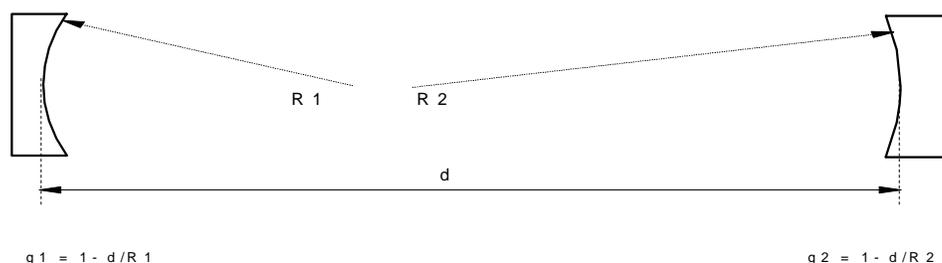
### Cavidades estables e inestables

Si armamos una cavidad resonante conformada por dos espejos de radios de curvatura  $R_1$  y  $R_2$ , separados por una distancia  $d$ , se puede demostrar que la cavidad será estable si:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1$$

donde hemos definido  $g_{1,2} = 1 - d/R_{1,2}$ . En cualquier otro caso la cavidad es inestable. Esta fórmula sencilla nos da un criterio rápido para diseñar cavidades. En la fórmula anterior se considera que los espejos

convergentes tienen radio de curvatura positivo.



- *En un gráfico  $g_1$  vs  $g_2$  encuentre las regiones donde las configuraciones son estables y donde son inestables*

### Enfoque del diodo láser

En esta práctica se va a utilizar un diodo láser como fuente de bombeo para un láser de Nd:YAG. Recorra al manual de la fuente del láser y siga las instrucciones de encendido para poner en funcionamiento el dispositivo. Asegúrese de que el láser está funcionando dentro de los parámetros normales que indica el manual.

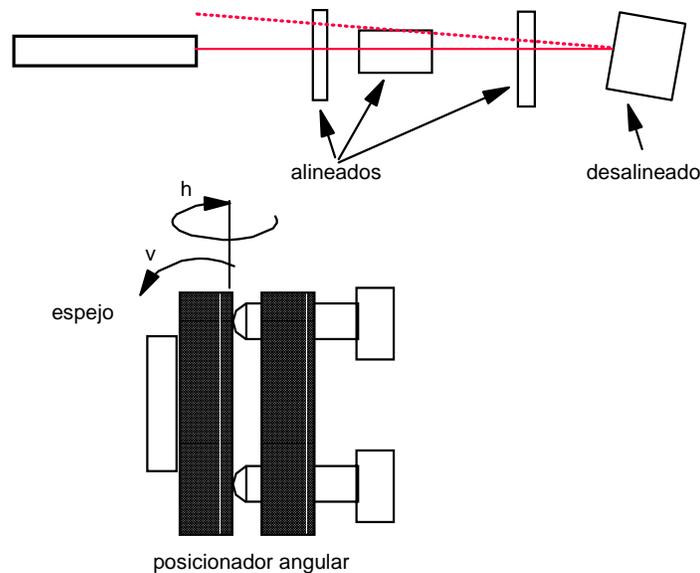
El láser tiene un sistema de enfoque compuesto por varias lentes (esféricas y cilíndricas) que permite enfocar la radiación de salida. El sistema de bombeo está diseñado para lograr una zona de enfoque pequeña donde se concentra la energía de bombeo y donde se debe ubicar la barra de Nd:YAG. Este sistema complicado de enfoque está diseñado para compensar la fuerte asimetría espacial de los diodos láser utilizados como fuentes de bombeo, que están compuestos por muchas fuentes muy pequeñas dispuestas en una línea de manera que el haz emitido por estos dispositivos de alta potencia tiene forma alargada, con valores muy diferentes de divergencia en las dos direcciones de propagación (vertical y horizontal). Para lograr excitación eficiente del láser que estamos bombeando, es necesario concentrar toda esta energía en una zona pequeña lo más cilíndrica posible, y por consiguiente se utilizan diferentes sistemas ópticos que compensan la asimetría de la fuente.

### Alineación de la cavidad

En una cavidad estable los espejos están alineados de manera que las sucesivas reflexiones de la luz en cada uno de ellos vuelven sobre sí mismas, repitiendo en cada pasaje la misma distribución de intensidades en cada punto de la cavidad. Para lograr esto es necesario alinear los espejos de la cavidad con mucho cuidado. Existen varios métodos que podemos emplear para alinear los espejos en una cavidad láser, tales como la utilización de auto-colimadores o telescopios. El método más cómodo, sin embargo, es utilizar un láser de He-Ne como elemento auxiliar que nos permita alinear los espejos de la cavidad en que estamos trabajando

mediante la superposición de las reflexiones del láser en los diferentes elementos ópticos de la cavidad. 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). Para alinear todos los elementos ópticos, monte los espejos en posicionadores angulares que le permitan mover los ángulos en la dirección vertical (v) y horizontal (h) en forma independiente. Estos montajes para espejos están provistos con tornillos de paso fino que permiten un control muy exacto de los dos ángulos en forma independiente.

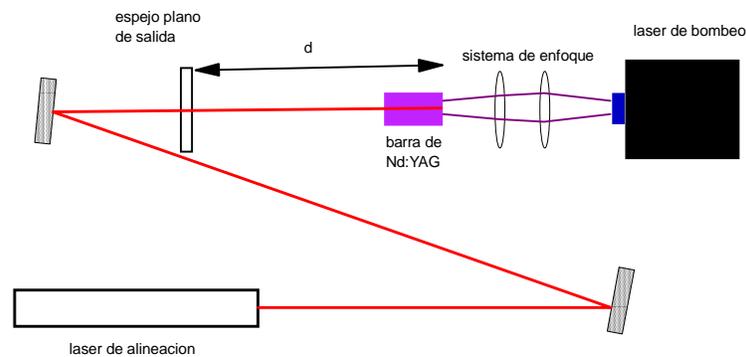
- *Estime la precisión angular con la que puede alinear los espejos.*
- *¿Dónde conviene ubicar el láser de alineación?*



Arme la cavidad que muestra la figura siguiente con un espejo plano de 99% de reflectividad y un espejo curvo. Según se vio anteriormente la condición de estabilidad de la cavidad depende del radio de curvatura de los espejos y de la distancia entre ellos. Para lograr alinear más fácilmente el láser optamos por una cavidad estable con un espejo de salida de alta reflectividad, lo que nos va a asegurar que el conjunto tenga un umbral de funcionamiento bajo y hará más sencillo el procedimiento de alinear. Observe que el dispositivo que se arma, aparte de los dos espejos que forman la cavidad láser, cuenta con otros dos espejos auxiliares que

dirigen el láser de He-Ne. En el proceso de alineación, el eje de la cavidad está definido por el volumen excitado en la barra de YAG, que proviene del enfoque del diodo láser. El eje de este pequeño cilindro es el eje de la cavidad y el procedimiento de alineación de los espejos consiste en ubicar los espejos de la cavidad con sus superficies perpendiculares a este eje. Para lograr esto es que se incluyen los dos espejos auxiliares, que permiten inicialmente alinear el haz del He-Ne con el eje definido por el volumen excitado. Observe que estos dos espejos dan todos los grados de libertad necesarios para hacer que ambos ejes coincidan. Una vez lograda esta alineación, proceda a alinear los espejos siguiendo el procedimiento explicado anteriormente (o sea alineando las reflexiones del He-Ne en las diferentes superficies).

- *Mida cuidadosamente el camino óptico de la cavidad. Tenga en cuenta que el índice de refracción del YAG es 1.85*
- *¿Qué configuración de cavidad se obtiene? Ubíquela en el gráfico  $g_1$  vs  $g_2$ . ¿En qué influye el largo de la cavidad?*



Una vez pre-alineado el láser, utilice la tarjeta infrarroja para comprobar que el láser está funcionando (recuerde que el láser YAG:Nd emite en infrarrojo cercano, con una longitud de onda central de  $1.06 \mu\text{m}$ ). Trate de medir la potencia de salida y optimice la alineación buscando el máximo de la señal en el medidor de potencia moviendo lentamente los espejos. Varíe la potencia de excitación del láser semiconductor variando la corriente y mida simultáneamente la potencia de salida del láser YAG. Obtenga una curva de eficiencia (potencia de salida en función de la potencia de bombeo).

El medidor de potencia calibrado que está utilizando integra temporalmente la energía recibida. Por lo tanto podemos decir que tiene

una resolución temporal baja o lenta. Para estudiar las características de la emisión en una escala de tiempos mas corta necesitaremos de un detector con una resolución temporal mejor.

Utilice un fotodiodo PIN que tiene una resolución temporal en el rango de los nanosegundos para hacer un estudio mas detallado de las características de la emisión del láser YAG.

TENGA LA PRECAUCIÓN DE ATENUAR FUERTEMENTE EL HAZ DE SALIDA, YA QUE LOS FOTODIODOS RÁPIDOS SON MUY DELICADOS Y PUEDEN DAÑARSE FÁCILMENTE CON UNA SEÑAL DE LUZ EXCESIVA.

A parte de esta precaución, asegúrese de que está trabajando con una señal de luz lo suficientemente pequeña como para no saturar el detector. Los fotodiodos rápidos entregan una señal eléctrica proporcional a la luz que reciben con gran resolución temporal. Para poder ver esta señal utilice un osciloscopio conectado al fotodiodo.

- *¿Cómo depende la potencia de salida del láser en función de la corriente de excitación en el diodo de bombeo?*
- *¿Cómo es la emisión láser en función del tiempo?*
- *Evalúe las pérdidas que tiene la cavidad que acaba de armar y calcule el valor de la ganancia en el umbral*
- *Discuta la eficiencia total del láser*

En la cavidad que acaba de armar se han incluido dos espejos, uno de reflectividad máxima (99.99%) que está depositado directamente en la cara posterior de la barra de YAG:Nd y otro que usamos como espejo de salida de 99%. Por lo tanto en cada recorrido la luz dentro de la cavidad experimenta una pérdida de un 1% causada por el espejo de salida y una ganancia o amplificación dada por la barra de YAG. Cuando el láser está funcionando (cuando supera la condición de umbral), significa que la ganancia del medio activo es suficiente para compensar las pérdidas de la cavidad. Se puede demostrar que la condición de funcionamiento del láser (condición de umbral) corresponde a una ganancia dada por:

$$g = 1/2L \ln[1/r_1 r_2] + \alpha$$

donde L es el largo de la barra de YAG y  $r_{1,2}$  las reflectividades de los espejos de la cavidad. También se incluye un factor de pérdida  $\alpha$ , que representa las pérdidas lineales (absorción y difracción) por pasaje.

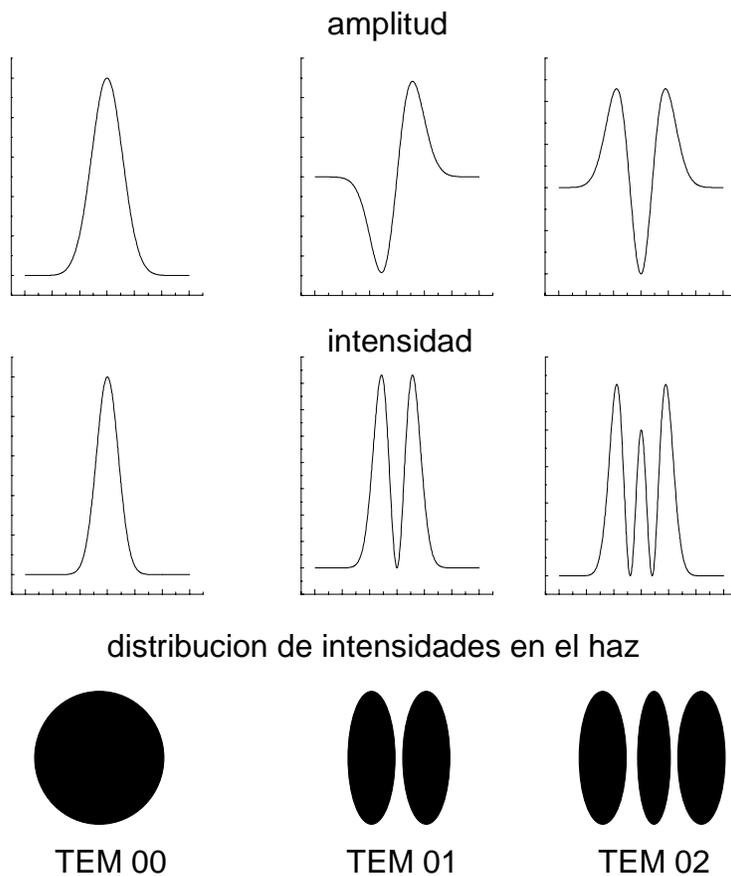
## **MODOS TRANSVERSALES**

Estudiaremos los modos transversales de oscilación de un láser continuo. Una cavidad resonante se forma cuando a un medio amplificador agregamos espejos a ambos lados para realimentar la radiación. Debido al diámetro finito de la barra de YAG que es el amplificador y de los espejos,

no se puede establecer una onda estacionaria de la forma de una onda plana entre los espejos, como sucedería si los espejos tuviesen diámetro infinito. Se puede demostrar que las posibles soluciones estacionarias para la distribución de intensidades dentro de la cavidad resonante sin paredes (abierta, como la de un laser), en función de la distancia al eje  $r$  (la coordenada usual en un sistema de referencia con simetría cilíndrica), son en este caso, una familia de funciones que llamamos  $TEM_{pq}$  o "modo transversal electro magnético de orden  $pq$ ". Los índices  $pq$  son números enteros que indican el orden de los polinomios de Hermite que forman parte de la expresión analítica de la solución. Una expresión general con la deducción detallada de estas funciones puede encontrarse en las referencias [1,3].

El modo más "bajo" es el modo  $TEM_{00}$  que corresponde a una distribución gaussiana de intensidades en función de  $r$ . Modos "superiores" tienen distribuciones un poco más complicadas, que incluyen combinaciones de los polinomios de Hermite para las dos coordenadas  $x$  e  $y$ . Estas soluciones se numeran con los subíndices  **$pq$**  que indican cuántos ceros tiene la intensidad en una dada dirección. Como ejemplo en la figura se indican las amplitudes, intensidades y un esquema aproximado de la distribución de intensidades en el haz para los modos  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$  y  $TEM_{02}$  considerando un sistema cartesiano. Estos modos se obtienen para un medio laser simétrico en la dirección transversal a la dirección de propagación del haz.

- *¿Qué indicarían los índices  $pq$  si se refieren a las coordenadas cilíndricas radiales ( $\rho$ ) y ángulo azimutal ( $\varphi$ )?*



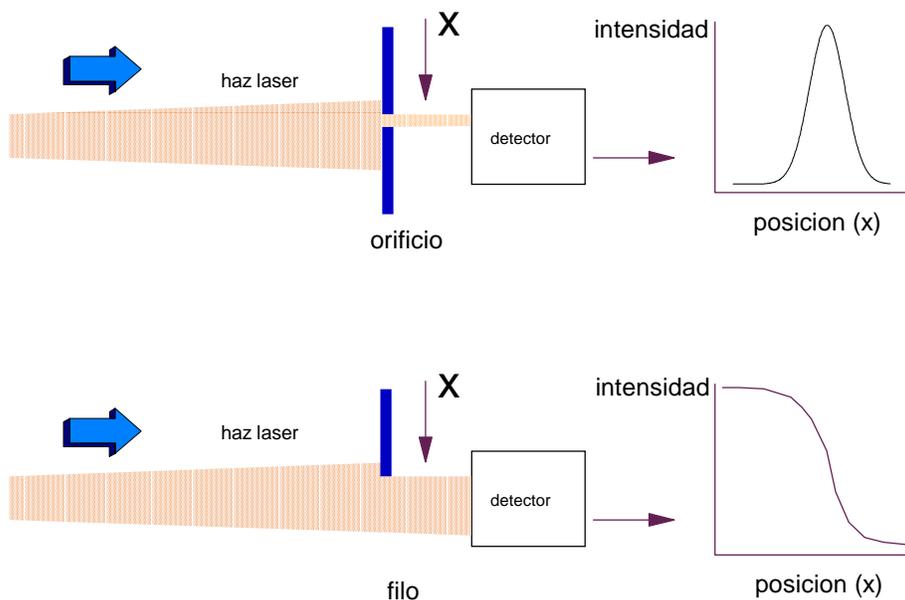
### Medición del perfil de intensidad

Arme una cavidad estable y ponga en funcionamiento el laser, optimizando la alineación de los espejos para obtener máxima potencia.

Con la tarjeta para detectar infrarrojo, observe la distribución de intensidad en el haz a varias distancias. ¿Qué observa?

Se puede medir la distribución transversal de intensidades del haz (perfil) utilizando un detector de potencia y una pequeña abertura más chica que el tamaño del haz. Desplazando la abertura y midiendo la potencia que pasa a través de ella se puede muestrear la intensidad para cada posición de la abertura. De esta forma podemos graficar la distribución de intensidades del haz en un corte transversal del mismo.

Si en lugar de medir detrás de una abertura, se mide la potencia que pasa cuando se desplaza un borde (filo) a través del haz, en lugar de medir la potencia para cada punto, se mide una señal que es proporcional a la integral de la distribución de intensidades (ver figura)

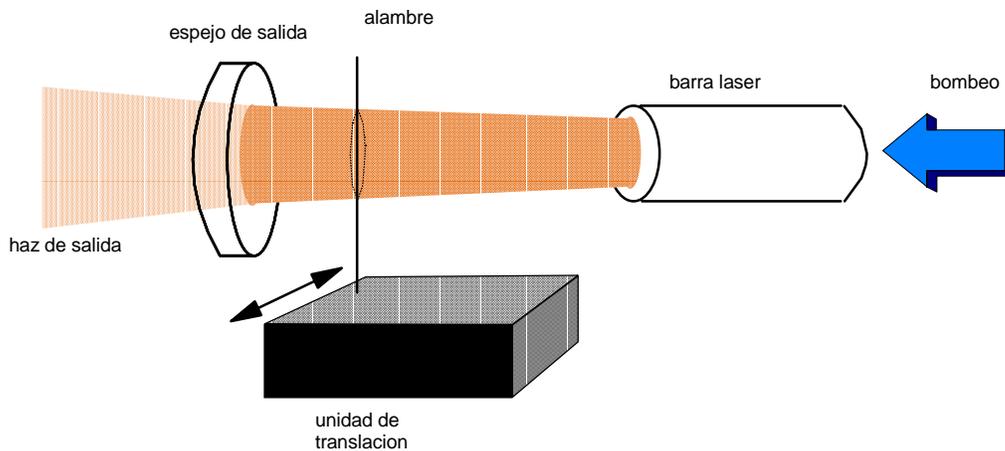


- *Diseñe un experimento y mida el perfil de intensidades del haz utilizando alguna de las dos sugerencias anteriores*

Los diferentes modos tienen diferentes distribuciones de intensidades en el plano transversal a la dirección de propagación del haz. Normalmente el laser opera en una superposición de todos los modos que estén por encima del umbral con intensidades relativas que van disminuyendo a medida que aumenta el “orden” del modo. Por eso, el laser funcionará normalmente predominantemente en el modo  $TEM_{00}$  (el de menor umbral) a menos que forcemos la extinción de ese modo en forma externa haciendo que prevalezcan ordenes superiores. Eso se puede conseguir introduciendo deliberadamente pérdidas en forma selectiva dentro de la cavidad.

Mientras está funcionando, introduzca dentro de la cavidad un alambre perpendicular al eje de la misma, montado sobre alguna plataforma que permita una translación suave y controlada a través del haz.

- *¿Dónde conviene colocar el alambre?*
- *Discuta brevemente qué diámetro aproximado debe tener el alambre y si esta magnitud influye en los resultados que obtiene.*
- *¿Importa si el alambre está horizontal o vertical?*



Mueva lentamente el alambre a través de la cavidad y observe qué sucede. Haga un diagrama de lo que observa y trate de explicar sus resultados. Sugerencia: cambie la configuración de la cavidad resonante cambiando la curvatura de los espejos y el largo de la cavidad. Compare los resultados que obtiene en cada caso.

## ***Bibliografía***

- 1- Láser Fundamentals. W. Silfvast, Cambridge University Press, 1996
- 2- Optical processes in Semiconductors. J. Pankove. Dover Public. Inc. 1975
- 3- Láser electronics. J. Verdeyen. Prentice Hall , 1995
- 4- Lasers. A. E. Siegman. University Science, Mill Valley, CA 1986
- 5- Solid State Láser Engineering. W. Koechner. Prentice Hall, NY 1992

## Apéndice 1

### ENCENDIDO:

1. Conectar el cable de alimentación de la **fente principal** a **220 V AC**, y **la tierra** a la mesa o **a una masa** del laboratorio.
2. Controlar que **las dos** fuentes auxiliares estén conectadas a la fuente principal, y éstas a su vez también estén conectadas a 220 V. (Una de ellas corresponde al **control de corriente de bombeo** y la otra al **control de temperatura** del diodo; verificar que estén correctamente conectadas).
3. **ENCENDER LAS DOS FUENTES AUXILIARES.**
4. **ENCENDER LA FUENTE PRINCIPAL**, con el pulsador de **“encendido general”**.

**VERIFICAR QUE EL CONTROL DE CORRIENTE  
SOBRE EL DIODO ESTÉ EN EL MÍNIMO.  
(CORRIENTE LASER  $\approx$  0.00A)**

5. **HABILITAR LA CORRIENTE SOBRE EL DIODO**, con el pulsador de **“encendido diodo”**.

## **APAGADO:**

- 1. DISMINUIR EL VALOR DE CORRIENTE** sobre el diodo láser hasta el mínimo (**CORRIENTE LASER  $\approx$  0.00 A**).
- 2. APAGAR EL DIODO**, con el pulsador **“encendido diodo”**.
- 3. APAGAR LA FUENTE PRINCIPAL**, con el pulsador **“encendido general”**.
- 4. ESPERAR APROXIMADAMENTE 10 MINUTOS** antes de apagar las fuentes auxiliares, para permitir el enfriado del equipo.
- 5. NO DESCONECTAR LAS FUENTES NI LA TIERRA DEL EQUIPO.**

## PRECAUCIONES GENERALES:

- El diodo láser es el paralelepípedo dorado montado sobre el disipador negro mate. En su parte superior están ubicados los 9 contactos que controlan la corriente de bombeo y la temperatura del láser. **Bajo ninguna circunstancia toque, puentee, cortocircuite o modifique estos contactos.**
- La abertura de salida de la radiación láser está ubicada en el frente del diodo. Ésta es una ventana muy delgada, sobre la que incide una alta densidad de energía; es por esto que la misma no debe presionarse ni ensuciarse. **Evite acercar los dedos a esta ventana. Tampoco manipule objetos pesados cerca de ella, ni la presione con la lente colimadora.**
- Las lentes de colimación y enfoque poseen un recubrimiento multicapa que las hace altamente transmisoras para la longitud de onda del diodo láser (808 nm). Estos recubrimientos son delicados y los ácidos de la transpiración de los dedos pueden dañarlos. Además la suciedad depositada en sus caras aumenta la reflectividad de estos elementos,

con la consiguiente pérdida de potencia final del láser. **Es por esto que debe evitar tocar las lentes de colimación y enfoque.**

•

**Fuente Auxiliar**

**Control de corriente**

**Fuente Auxiliar**

### ***Control de temperatura***

**Corriente**

**Temperatura**

**Tierra**