

Construcción y caracterización de un láser de Nd-YAG

Laboratorio 5 - FCEN - Universidad de Buenos Aires

Mateo Pérez Bertolli , Daniel Fondevila

Resumen

En este trabajo se construyó un láser de Nd-YAG alimentado por un diodo láser. Se lo caracterizó como haz Gaussiano, midiéndose la cintura y obteniendo una divergencia de 1.43mrad. Se obtuvo una eficiencia de láseo al menos un 25 % mayor la máxima alcanzable con una lámpara de descarga.

I. INTRODUCCIÓN

Los láseres Nd-YAG tienen actualmente una amplia empleabilidad, siendo frecuentemente utilizados con fines médicos e industriales. Su principio de funcionamiento consiste en la excitación de los electrones de moléculas de Neodimio (Nd) hospedadas en un cristal de Granate de Itrio y Aluminio (YAG), generando posteriores decrecimientos de su energía que conllevan a la emisión de fotones en una longitud de onda definida, constituyentes del haz del láser. En los últimos años el bombeo óptico mediante diodos láser ha cobrado popularidad como método para generar dicha excitación, por ser económicamente más accesible y energéticamente más eficiente que métodos anteriores (como las lámparas de descarga) dado que estos emiten luz en una longitud de onda definida que favorece la excitación deseada. En este trabajo se montó un láser de este tipo, utilizando un diodo láser como fuente de bombeo y se estudiaron sus cualidades. Se obtuvo un valor aproximado de su eficiencia (es decir el cociente entre la potencia del haz emergente P_e y la potencia entregada por el haz de bombeo P_b), la cual fue un 25 % superior a la máxima alcanzable utilizando una lámpara de descarga [1]. También se estudió su colimación y se caracterizó su perfil de intensidades: El haz contó con un perfil Gaussiano de cintura $(1,6036 \pm 0,0005)mm$ a 23.3cm de la salida del láser, y divergencia $(1,43077 \pm 4,10^{-6})mrad$.

II. MODELO UTILIZADO Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los fotones que conforman el haz de un láser de Nd-YAG, son los emitidos por los electrones de los átomos de Neodimio al decaer su nivel de energía, que en este caso, son continuamente excitados con un haz de bombeo. Estos láseres pertenecen a la categoría de láseres de cuatro niveles. Es decir, su com-

portamiento al ser bombeados con una longitud de onda de aproximadamente 807nm puede ser descrito mediante un modelo que supone la existencia de únicamente cuatro niveles de energía de los electrones del Neodimio. Como lo describe la teoría cuántica, estos niveles tienen energías bien definidas, por lo que una transición entre ellos tomará lugar únicamente si cantidades específicas de energía son absorbidas o liberadas. Esto implica que únicamente serán absorbidos fotones (provenientes del haz de bombeo) o emitidos fotones (que conformarán el haz del láser) con longitudes de onda bien determinadas. En el siguiente esquema se muestran los distintos niveles de energía considerados en el modelo y los tipos de transiciones que toman lugar entre ellos [2].

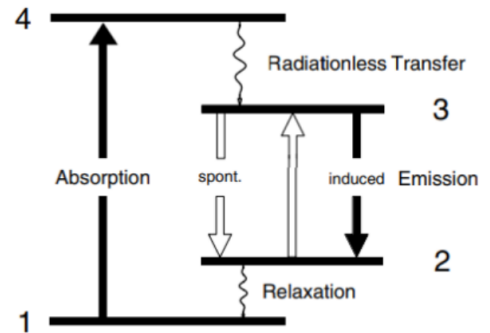


Figura 1: Esquema de los cuatro niveles de energía de los electrones del Neodimio involucrados en el funcionamiento del láser.

Como se indica en la figura (1), existen cuatro transiciones distintas consideradas en nuestro modelo. La primera toma lugar ante la absorción de un fotón de bombeo, y ocurre desde el estado fundamental 1 del electrón hacia el estado de máxima energía 4. Esta transición puede ocurrir ante la absorción de fotones con longitud de onda de entre los 804nm y 812nm.

Luego, existen dos transiciones que ocurren sin absorción o emisión de fotones, dadas del estado 4 al 3 y del 2 al 1. Estas transiciones son las que permiten generar un haz emergente de la barra de Nd-YAG, con longitud de onda distinta a la de bombeo. Por último, existen dos transiciones que toman lugar entre el estado tres y dos, y aunque ambas conllevan la emisión de un fotón (en nuestro cristal, con longitud de onda de 1064nm), son de naturaleza distinta. La primera, la emisión espontánea, se da por las propiedades estocásticas intrínsecas del electrón, según las cuales hay una probabilidad constante de que este decaiga emitiendo un fotón. La segunda, la emisión inducida, se da ante la interacción del electrón con un fotón inductor de igual longitud de onda que el emitido en una emisión espontánea, y da lugar a un fotón idéntico al inductor. Esta segunda transición produce que la emisión de fotones sea mayor cuando el cristal es iluminado por un haz de 1064nm además del de bombeo.

La emisión inducida es fundamental para poder generar un haz colimado, y es la razón por la cual el sistema del láser de Nd-YAG cuenta con otra componente esencial: la cavidad resonante. Esta consiste de dos espejos paralelos, que pueden ser planos o cóncavos, dispuestos a ambos lados del cristal. La finalidad de esta cavidad es reflejar los fotones emitidos por el cristal hacia el mismo, e incitar la emisión inducida. De este modo se genera un proceso de retroalimentación, dando lugar a una mayor emisión de fotones en la longitud de onda deseada por parte del cristal. Adicionalmente, estos espejos producen un haz colimado, dado que los fotones generados por emisión inducida se emiten en igual dirección y sentido que el inductor. Esta situación genera modos de resonancia de luz dentro de la cavidad óptica, que dependerán de la forma y distancia entre sus espejos; imponiendo la condición de contorno dada por una intensidad nula en la superficie de los espejos del resonador, se puede probar que, para una cavidad formada por espejos planos y paralelos (como la construida en este trabajo), un haz Gaussiano será la solución estacionaria predominante dentro de la cavidad. Esto último será analizado para nuestro láser en este trabajo. En la figura (2) se muestra el esquema general de una cavidad resonante de este tipo [3]. Es de vital importancia que el último espejo que forma la cavidad tenga una reflectividad menor al 100%, de modo que el sistema emita un haz fuera de la cavidad.

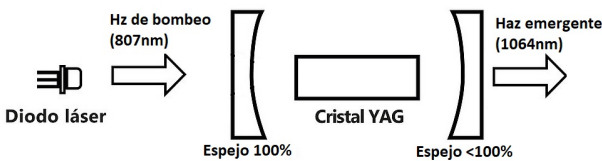


Figura 2: Esquema básico de la composición de un láser de Nd-YAG, notar que en esta disposición el espejo de la izquierda debe ser unidireccional.

A partir del modelo de cuatro niveles se puede

derivar la ecuación 1, que describe una relación lineal entre la potencia del haz de bombeo y la del haz emergente de la cavidad de resonancia, cuando el bombeo se realiza de forma constante. [4]

$$P_e = \eta \frac{E_{32}}{E_{41}} (P_b - P_{th}) \frac{T}{T + L} \quad , \quad (1)$$

donde P_e es la potencia del haz del láser de Nd-YAG, P_b es la potencia del haz de bombeo y P_{th} es el umbral de potencia del láser. Las constantes E_{32} y E_{41} son las diferencias de energía entre los estados 3-2, y 4-1 respectivamente, T el índice de transmisión del espejo de salida de la cavidad resonante y L la pérdida del resonador (que puede tener varios orígenes, como una alineación incorrecta, efectos de difracción o absorción en los espejos, etc). El factor η es la eficiencia de bombeo, el cual está determinado por las características de la barra de Nd-YAG y del haz de bombeo. Es importante destacar que esta ecuación es válida para valores de P_b mayores a P_{th} , mientras que para valores menores de P_b , vale $P_e = 0$.

III. CARACTERIZACIÓN DEL DIODO LÁSER DE BOMBEO

Con el fin de realizar un análisis integral sobre el láser de Nd-YAG, se caracterizó el dispositivo de bombeo, un diodo láser SDL 2371-P1. En particular se midió la potencia y longitud de onda emitidas en función de la corriente de alimentación, y se observaron sus estabilidades en el tiempo. La potencia en función de la corriente de alimentación será útil para obtener la potencia emitida por el láser de Nd-YAG en función de la potencia de bombeo (P_l vs P_b) y calcular así su eficiencia. Por otro lado, la longitud de onda del diodo láser es relevante pues, como se mencionó, el pasaje del estado 1 al 4 de los electrones del Neodimio ocurren únicamente en ante la absorción de fotones con longitudes de onda en el rango (804-812)nm.

III.A MEDICIÓN DE LA CURVA POTENCIA VS. CORRIENTE

El haz del diodo láser no estaba colimado, sino que se enfocaba en un punto mediante un sistema de lentes. Esto es así para lograr que la barra de Nd-YAG capture la mayor cantidad de potencia posible. Para la medición de la potencia de salida en función de la corriente de alimentación se utilizó un medidor de potencia Melles Griot 13PEM001, el cual fue colocado a 2,5 cm del foco debido a que la intensidad del láser de bombeo en el punto de convergencia era demasiado alta y podía dañar al dispositivo. Con esta configuración se midió por lo tanto la potencia de la porción del láser incidente en el sensor, y no la totalidad de la potencia de salida. Se tomó un total de 23 mediciones de potencia

para el rango operativo de corrientes de alimentación, que estaba comprendido entre los 0 y 2,38 A.

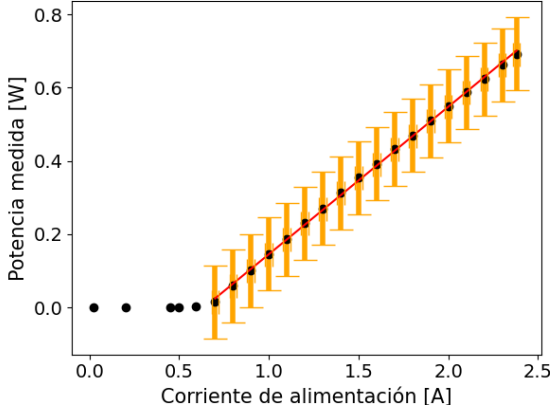


Figura 3: Potencia medida a 2.5cm del foco del diodo láser en función de la corriente de alimentación del mismo. Se observa un comportamiento lineal a partir de los ~ 0.75 A. En rojo, un ajuste lineal de los datos con este comportamiento.

Como se observa en la figura (3), la potencia de salida presentó un umbral respecto a la corriente de alimentación y una dependencia lineal para corrientes por encima del mismo. Del ajuste lineal realizado se obtuvieron la pendiente $\alpha = (0,40292 \pm 6^{-6})V$ y el umbral de corriente $U_c = (0,6395 \pm 4^{-5})A$. La pendiente obtenida difiere del valor previamente medido por los docentes [5], que es cercano a 1V. Para medir la potencia total entregada por el diodo láser, es necesario un sensor que pueda manejar los valores de intensidad en el foco del láser, o un sensor con una mayor área de medición.

III.B MEDICIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE

Para esta medición se utilizó un espectrómetro Thorlabs CCS200/M, el cual fue operado con el software provisto por el fabricante. Se dispuso el sensor a aproximadamente 40 cm del foco del diodo láser, y se midió la longitud de onda del haz emitido por el diodo láser para corrientes de alimentación entre 0.6A (\sim umbral de láseo) y 2.39A.

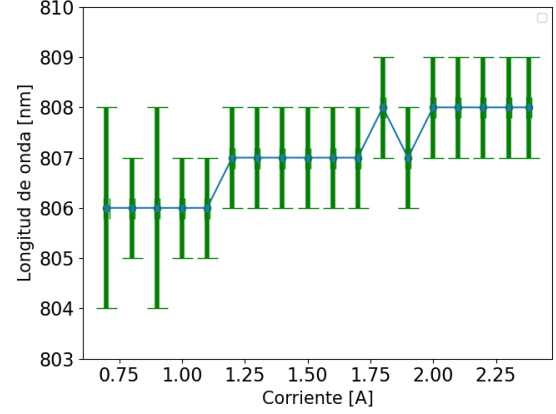


Figura 4: Longitudes de onda medidas para distintas corrientes de alimentación del diodo láser.

Como se muestra en la figura (4), las longitudes de onda medidas variaron entre 806nm y 808nm, con errores alrededor de los 2 nm, estando estas dentro del rango deseado de 804nm-812nm. Durante el experimento no se notaron variaciones de la longitud de onda en el tiempo una vez fijada la corriente.

IV. MONTAJE DEL LÁSER DE ND-YAG

Los componentes que conforman el láser fueron: el diodo láser caracterizado en la sección anterior, un cristal cilíndrico de Nd-YAG de emisión a 1064 nm montado en un posicionador, un espejo dieléctrico con reflectividad de 98 % selectiva para 1064nm y un espejo dieléctrico unidireccional con reflectividad mayor al 99 % . El espejo unidireccional se encontraba adherido a uno de los lados de la barra de Nd-YAG. Adicionalmente, para la alineación de la cavidad resonante del láser, se utilizó un láser de Helio-Neón, dos espejos de plata montados en posicionadores y el sensor de potencia Melles Griot 13PEM001 utilizado anteriormente. Todos los elementos mencionados se montaron sobre una mesa óptica.

IV.A ALINEACIÓN DE LA CAVIDAD RESONANTE

La alineación de la cavidad se realizó únicamente con el láser de Helio-Neon (el de bombeo permaneció apagado), y constó de dos etapas. En la primera se colocó la barra de Nd-YAG, con su espejo adherido, en el foco del láser de bombeo, y se definió una altura patrón como su altura respecto de la mesa óptica. Luego, se dispusieron los espejos de plata de modo que dirigieran el láser de He-Ne hacia la barra de Nd-YAG como se muestra en la figura (5). Se procuró que el haz incidiera en el centro del espejo de plata 2 a la altura patrón y luego se utilizaron los posicionadores de los espejos y del cristal para que la reflexión del láser en la barra de Nd-YAG recorriera la trayectoria inversa que el haz incidente sobre la misma, volviendo a la apertura del láser de He-Ne.

El procedimiento recién mencionado nos asegura que el haz del He-Ne incide de forma perpendicular sobre la barra de Nd-YAG, y que la superficie de la barra de Nd-YAG forma un ángulo de 90° con la superficie de la mesa óptica. Realizado esto, no se volvieron a ajustar los espejos ni el cristal.

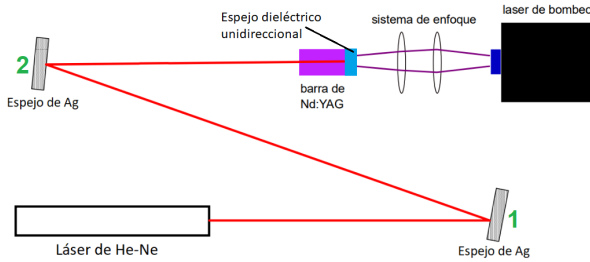


Figura 5: Primera configuración utilizada para la alineación de la cavidad óptica. El láser de bombeo permaneció apagado durante la alineación de la cavidad. El espejo adherido a la barra de Nd-YAG refleja únicamente de izquierda a derecha

En la segunda etapa se introdujo el espejo dieléctrico de reflectividad 98 % entre el espejo numero 2 y la barra de Nd-YAG, asegurando que la altura del centro del espejo sea la altura patrón. Luego, se oriento únicamente el espejo dieléctrico de modo que las reflexiones provenientes de la cavidad incidieran en la apertura del láser de Helio-Neon. Esto aseguró que las superficies de la barra de Nd-YAG, la de su espejo adherido y la del espejo con reflectividad 98 % sean paralelas. Una vez alineado el sistema, se encendió el láser de bombeo y colocando una tarjeta infrarroja en la salida de la cavidad, se verificó la presencia de un haz emergente colimado. Luego se colocó el sensor de potencia en la salida de la cavidad y se ajustó muy levemente la orientación del espejo dieléctrico, hasta maximizar la potencia registrada por el sensor. Terminando aquí el proceso de alineación del láser.

V. CURVA DE EFICIENCIA PARA TRES LONGITUDES DE LA CAVIDAD DE RESONANCIA

V.A PROCESO DE MEDICIÓN

Montado el láser, se comenzó su caracterización midiendo, para tres tamaños de la cavidad de resonancia (6.2cm, 8.8cm y 11.3cm de distancia entre los espejos que la conforman), la dependencia de su potencia de salida con respecto a la corriente de alimentación del láser de bombeo. Como vimos, existe una dependencia lineal entre la potencia de salida del láser de bombeo y su corriente de alimentación, por ende, una relación lineal entre la potencia de salida del láser de Nd-YAG y la corriente de alimentación del láser de bombeo, implicaría una dependencia lineal de la potencia de salida del láser de Nd-YAG respecto a la potencia del haz de bombeo. Este resultado se correspondería con el predicho por la ecuación (1).

El procedimiento para medir la curva de potencia vs. corriente en cada cavidad fue el siguiente:

- Se montó la cavidad a caracterizar siguiendo el proceso de alineación descrito en la sección anterior.
- Se colocó al sensor de potencia Melles Griot13PEM001 a $(6,20 \pm 0,2)$ cm del espejo de salida.
- Se ajustó delicadamente la orientación del sensor hasta maximizar la potencia registrada por el mismo.
- Se midió la potencia registrada por el sensor en el rango de corrientes 0,65A (el umbral de corriente del diodo láser) a 2,39 A.

El seguimiento de estos pasos fue necesario para que las mediciones realizadas en las diferentes cavidades se efectúen de igual manera, procurando que la diferencia entre las potencias medidas en cada cavidad provengan de las características de las mismas y no del procedimiento de medición.

V.B RESULTADOS OBTENIDOS Y CALCULO APROXIMADO DE LA EFICIENCIA DEL LÁSER

En la figura (6), se muestran las curvas obtenidas para las 3 cavidades. Vemos que la dependencia de la potencia con la corriente de alimentación no es lineal, a diferencia de la predicha por el modelo utilizado. Si bien no fue posible determinar el origen de este fenómeno, en el apéndice (VIII) se discuten algunas propuestas que intentan explicarlo.

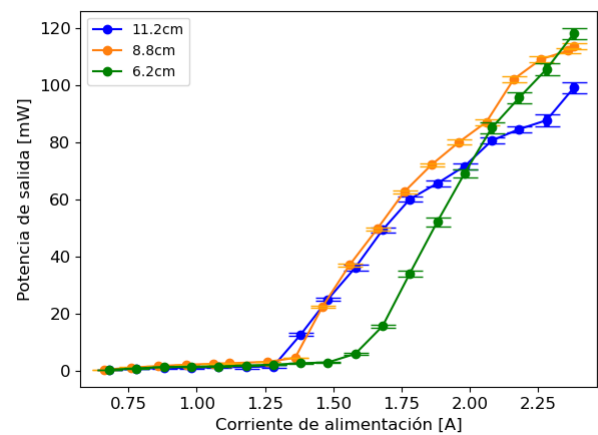


Figura 6: Curvas de potencia de salida del láser de Nd-YAG en función de la corriente de alimentación del láser de bombeo para distintas cavidades.

Continuando con el análisis de estos datos, se calcularon valores aproximados de la eficiencia de las tres cavidades (P_i/P_b), al ser alimentadas con la mayor potencia de bombeo soportada por el diodo láser. Fue necesario contar con un valor al menos aproximado

de la potencia del haz de bombeo en su foco (donde se colocó la barra de Nd-YAG) para la corriente máxima de alimentación del diodo láser. Dado que la pendiente de la curva P_b vs corriente de alimentación medida en este trabajo, es menor a la adquirida previamente por los profesores (porque el sensor no se colocó en el foco del diodo en nuestro caso), se utilizó la potencia en el foco provista por ellos [5] para calcular la eficiencia aproximada de las tres cavidades en la máxima potencia de bombeo. Se obtuvieron así las eficiencias $E_{11,2cm} \sim 0,05$, $E_{8,8cm} \sim 0,055$, $E_{6,2cm} \sim 0,06$ para las cavidades de 11,2cm, 8,8cm y 6,2cm respectivamente. Siendo las tres al menos un 25 % superiores a la eficiencia máxima de 0.04 alcanzable mediante una lámpara de descarga[1].

VI. COLIMACIÓN Y PERFIL DE INTENSIDADES DEL HAZ

Recordemos que, como fue discutido en la sección (II), el perfil de intensidades del haz emergente de nuestra cavidad se puede describir mediante una función Gaussiana (en función de la distancia al eje del haz). En particular, esta función será de la forma [6]:

$$I(r) = \frac{2P}{\pi w^2} \exp(-2r^2/w^2) \quad , \quad (2)$$

donde I es la intensidad del haz, r es la distancia al centro del mismo, P la potencia total, y w es comúnmente denominado *cintura* del haz. Para caracterizar la colimación de nuestro láser se midió w a diferentes distancias del espejo de salida del resonador. Para ello se utilizaron un chopper óptico, un fotodiodo no calibrado (pero que se supuso, medía un voltaje con proporcionalidad directa a la potencia incidente en su sensor), y un osciloscopio Tektronix TDS1002B, dispuestos como se observa en la figura (7). Las aspas del chopper fueron colocadas entre el láser de Nd-YAG y el fotodiodo de modo que cuando las mismas comenzaran a girar, estas bloquearan el haz de forma intermitente. El osciloscopio fue conectado a una computadora, en la cual se almacenaron y analizaron los datos medidos.

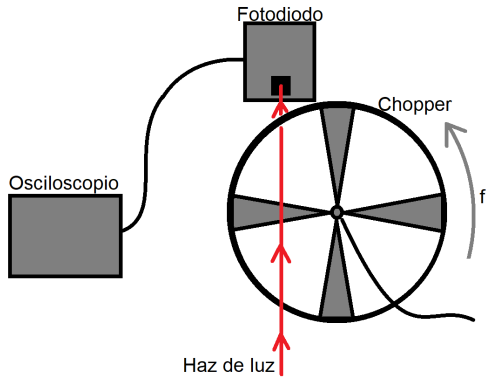


Figura 7: Armado experimental utilizado para la medición de w . El chopper se encuentra conectado a una fuente que controla su frecuencia de giro f .

Integrando el perfil de intensidades descrito por la ecuación (2) sobre la sección no obturada (por el chopper) del haz, se puede probar que las mediciones del fotodiodo obtenidas con nuestro armado, a medida que un aspa del chopper destapa el haz, están dadas por

$$V(x) = A \cdot \text{erf} \frac{x - x_0}{w} \quad . \quad (3)$$

Donde V es el voltaje enviado por el fotodiodo al osciloscopio, x es la posición del borde del aspa en la dirección en que el haz es cortado, erf denota a la función error y, en lo que nos concierne, A y x_0 son parámetros libres. Es importante destacar que la deducción de esta ecuación requiere aproximar al radio del aspa respecto a su eje de rotación, infinito en el punto que esta obtura al láser.

La medición que muestra el osciloscopio es voltaje en función del tiempo, y para ajustar nuestros datos con la ecuación (3), fue necesario convertir los tiempos a posición del borde del aspa. En la figura (8) se muestra un ejemplo de la medición de voltaje del fotodiodo vs x para el momento en que una de las aspas deja de obturar el haz del láser, con su correspondiente ajuste mediante la ecuación (3), utilizado para obtener el valor de w . Es importante destacar que la calidad del ajuste que se observa en la misma se observó en todas las mediciones excepto en la de menor distancia (la variación de todos modos no era muy grande), indicando esto que el perfil de intensidades del haz era Gaussiano.

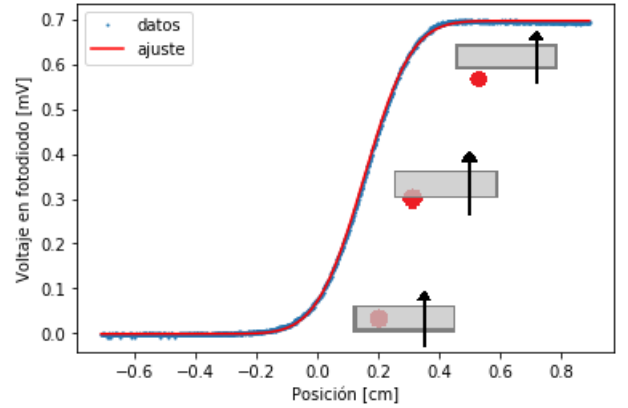


Figura 8: Voltaje medido por el fotodiodo en función de la posición x del borde del aspa del chopper y el ajuste realizado. A la derecha se representa de forma cualitativa la posición del aspa respecto al láser correspondiente a cada medición. Si bien los errores de los puntos no se graficaron (puesto que se veían superpuestos), si fueron considerados en el ajuste

En la figura (9), se presentan los valores de w medidos con el método recién descrito, a distintas distancias del espejo de salida. Se observa una dependencia lineal de w con la distancia.

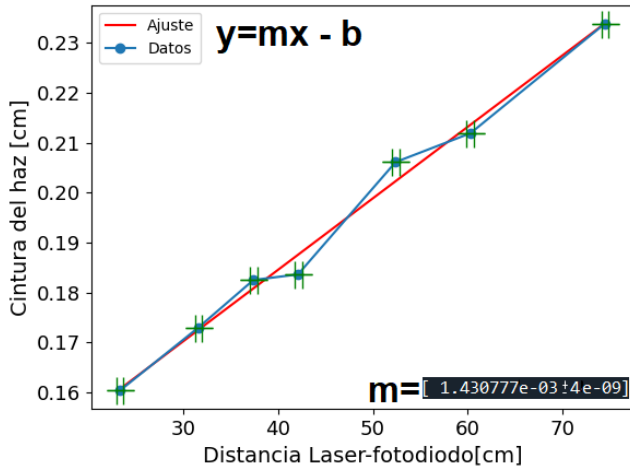


Figura 9: Ancho medio del haz en función de la distancia a la cavidad del láser, junto al ajuste lineal realizado.

La cintura w medida a $(23,3 \pm 0,4)cm$ del espejo de salida de la cavidad, la menor distancia a la que se la midió, fue $w_{23} = (1,6036 \pm 0,0005)mm$. Con la pendiente del gráfico es posible calcular la divergencia en términos del ángulo que subtiende al haz. Luego la divergencia es de $(1,43077 \pm 4e^{-6})mrad$. Comúnmente los láseres bien colimados con cavidades extensas cuentan con una divergencia menor a $1mrad$.

VII. CONCLUSIONES

Se logró construir un láser de Nd-YAG, evidenciándose en el proceso la importancia de la correcta aplicación del procedimiento de alineación de sus componentes. Se logró también caracterizarlo, contrastando el comportamiento del mismo con los predichos teóricamente; en particular, se pudieron medir las curvas P_l vs corriente de alimentación para las tres cavidades construidas, exhibiéndose un comportamiento no totalmente lineal (a diferencia de lo predicho por la teoría), cuyo origen no pudo ser determinado.

Las mediciones realizadas permitieron también evidenciar las ventajas de utilizar un diodo láser como fuente de bombeo, al obtener valores aproximados de la eficiencia de las tres cavidades construidas, siendo en los tres casos la relación P_l/P_b al menos un 25 % mayor que la máxima alcanzable utilizando una lámpara de descarga como fuente de bombeo.

Por último, se midió la colimación del haz y, de forma indirecta, se caracterizó su perfil de intensidades, el cual exhibió un comportamiento Gaussiano, resultado acorde al predicho teóricamente. Respecto a la colimación, se midió una cintura del haz de $w_{23} = (1,6036 \pm 0,0005)mm$ a $(23,3 \pm 0,4)cm$ de la salida del mismo, y una divergencia de $(1,43077 \pm 4e^{-6})mrad$.

VIII. REFERENCIAS

- [1] Eficiencia de bombeo con lámparas de descarga vs con diodos láser: [link](#)
- [2] La figura fue tomada del siguiente artículo: [link](#)
- [3] La figura fue tomada de la siguiente página web: [link](#)
- [4] Ecuación 1.3 de: [link](#)
- [5] Curva potencia vs corriente medida por profesores: [link](#)
- [6] El método aplicado para las mediciones de w , así como todas las ecuaciones de la sección 4, provienen de el siguiente artículo : [link](#)

APÉNDICE

Sobre los resultados inesperados en la medición de potencia vs. corriente del láser de Nd-YAG

En este apartado intentamos discutir algunas propuestas que consideramos podrían resolver la discrepancia en la dependencia encontrada y la predicha por el modelo, para la potencia del láser de Nd-YAG en función de la corriente que fue observada en la figura (6).

LA TERMODINÁMICA DE LA BARRA DE ND-YAG:

En primer lugar se consideró que la no linealidad podría estar asociada al hecho de que el experimento no fue realizado teniendo control sobre todas las variables del sistema, en particular no se controló la temperatura de la barra de Nd-YAG: Debido a que el haz del diodo láser converge en un punto, la intensidad de la luz en esa región es alta, y creciente con la corriente (de hecho no podíamos poner el sensor ahí porque se quemaba). Esto implica que cuando se coloca un material en el punto de convergencia, la temperatura del mismo cambia, y las propiedades termodinámicas de este podrían volverse relevantes. En particular la eficiencia de bombeo η (ver ecuación 1) puede depender de la temperatura de la barra de Nd-YAG, comprometiendo la dependencia lineal predicha por la relación P_l vs P_p .

EL SENSOR MELLES GRIOT13PEM001:

Cuando se aumentaba la corriente de alimentación, se observaba un incremento abrupto de la potencia medida, seguida de una lenta caída hasta un valor alrededor del cual oscilaba con un pequeño margen. Este sensor además, se encontraba dañado en la superficie de detección y esto podría estar afectando las mediciones. Se realizó una segunda medición utilizando un fotodiodo como detector, únicamente para la cavidad de 6,2cm. La curva obtenida es la siguiente

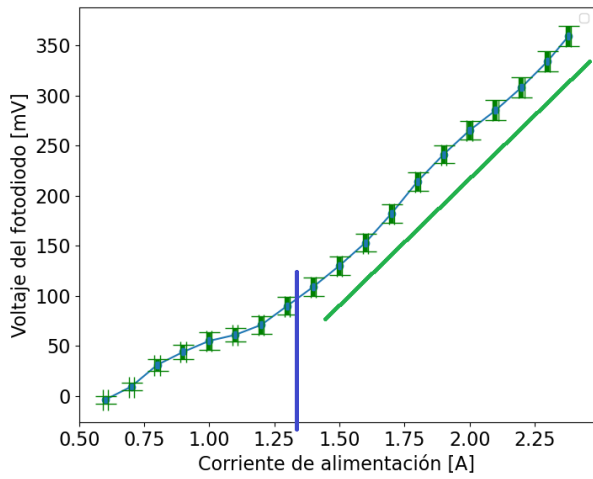


Figura 10: *Medición del voltaje que genera el haz sobre el fotodiodo en función de la corriente de alimentación.*

Algo a destacar es que el decaimiento de la poten-

cia observado luego de ajustar la corriente de alimentación no estuvo presente al realizar las mediciones con el fotodiodo, lo que indica que este comportamiento estaba generado por el sensor Melles Griot.

En la figura (10) vemos que a partir de los valores de corriente entre 1,25 y 1,5A, la relación entre el voltaje medido por el fotodiodo y la corriente es lineal. Si bien anteriormente se midió que el umbral de corriente para las cavidades se encuentra alrededor de 1,25A para dos de ellas y en 1,75A para la mas chica, solo se midió 1 curva para cada cavidad, por lo que no es posible llegar a una conclusión concreta al respecto. Además, como este análisis pretende ser cualitativo, a efectos prácticos podemos considerar el umbral de las tres cavidades como similares. Luego, podemos vincular la curva recién mostrada con la medida anteriormente en el rango de corrientes pertinente, y finalmente considerar que una falla del sensor Melles Griot13PEM001 fue la principal candidata de la inesperada medición.