

Caracterización de un láser de Nd:YAG con diferentes cavidades ópticas

Franco Nicolás Nieto, Miguel Ángel Ávila Carrero, Christopher Gabaldón

Laboratorio 5, Segundo Cuatrimestre 2023, Cátedra G. Grinblat

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Resumen

En este trabajo se estudiaron los fenómenos que permiten la confección de un láser continuo de una longitud de onda de 1064 nm asociada a la emisión del medio amplificador Nd:YAG. Para diferentes cavidades ópticas formadas por espejos que sirven como medio de retroalimentación, se caracterizó la potencia del haz de salida respecto al haz de bombeo. Posteriormente se comparó la eficiencia de las distintas configuraciones ópticas y se calcularon las potencias de bombeo para las cuales se comienza a producir el laseo en cada una, ya sea variando la forma de la cavidad (lineal o en V) o las diferentes reflectividades de los espejos (98 % y 90 %). Finalmente, se estudiaron los modos TEM_{pq} que fueron posibles de inducir sobre el láser a partir de variaciones en las dimensiones de la cavidad en V.

1. Introducción

1.1. Motivación

Los láseres son una herramienta importante tanto para la óptica como para otras áreas de investigación y de la industria, como la medicina y la ingeniería. Al ser un instrumental con un rango de aplicaciones muy amplio, es importante estudiar y conocer su funcionamiento.

1.2. Láser

Un láser es un dispositivo que emite radiación electromagnética altamente brillante, colimada y coherente, tanto espacial como temporalmente. El funcionamiento del láser se debe a dos efectos cuánticos que ocurren debido al cambio de niveles energéticos en los electrones de ciertos átomos. El primero de los procesos es la *emisión espontánea*, en la cual el decaimiento de un electrón de un estado excitado produce un fotón con fase y dirección aleatoria pero con una energía dada por la diferencia entre el nivel inicial y el nivel al cual decae el electrón según $E_1 - E_2 = -h\nu$, donde $h\nu$ es la energía que contiene el fotón dependiente de su frecuencia.

El segundo de los procesos es la *emisión estimulada*, donde un fotón de una frecuencia específica interactúa con un electrón en un estado excitado y en respuesta este cae a un nivel de energía más bajo. La energía liberada se transfiere al campo electromagnético, creando un nuevo fotón con una fase, frecuencia y dirección de desplazamiento idénticos a los fotones de la onda incidente. Se

puede ver un esquema de estas emisiones en la Figura 1.

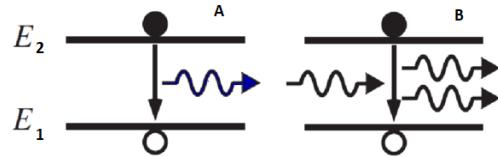


Figura 1: Esquematización de los dos tipos de emisiones de radiación electromagnéticas estudiadas. La Figura A (izquierda) corresponde a una emisión espontánea de un fotón. La Figura B (derecha) corresponde a una emisión estimulada por un fotón, provocando la emisión de otros dos fotones.

En cuanto a su composición, un láser consta de tres componentes básicos: un mecanismo de bombeo, que se encarga de suministrar la energía necesaria para sostener la emisión láser; un medio amplificador, que se encarga de transferir la energía del bombeo al haz que en nuestro caso es una barra de Nd:YAG; y un medio de retroalimentación, que consiste en una cavidad óptica resonante encargada de reinyectar parte de la señal al medio activo haciendo que con cada paso por el medio activo se obtenga una amplificación mayor, además de generar las propiedades de alta coherencia y colimación del haz.

Los dos principales mecanismos de emisión pueden observarse en la Figura 2.

Donde las emisiones que se dan de niveles energéticos $E_2 \rightarrow E_1$ son los valores de longitud de onda que van a componer el espectro del láser. Las emisiones pueden tener un origen espontáneo en cierto tiempo característico; o estimulado, en

la que un fotón emitido anteriormente con energía $h\nu_{\text{láser}} = E_2 - E_1$, vuelve por el sistema de retroalimentación e impacta un electrón en estado E_3 , haciendo que se emitan dos fotones de esta misma longitud de onda. Luego de emitir el fotón por cualquier tipo de mecanismo de emisión, el electrón puede absorber la energía del láser de bombeo, dando lugar al cambio energético del nivel $E_0 \rightarrow E_3$, el cual permite la energía disponible para la emisión en otras longitudes de onda.

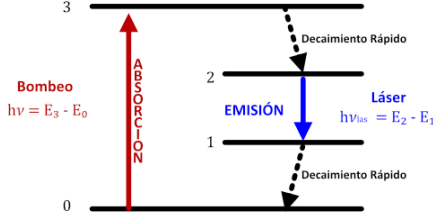


Figura 2: Balance energético de los estados de los electrones presentes en el medio amplificador Nd:YAG

Por otra parte, se tienen los decaimientos rápidos, los cuales son aquellas variaciones de energía no radiativas. Durante estas variaciones energéticas, la energía liberada se puede dar en forma de fonones, es decir vibraciones de la red cristalina de la estructura del amplificador, lo cual va a generar un aumento en la temperatura a partir de calor. Notar que los decaimientos rápidos no siempre se dan para una misma diferencia de energía $E_3 - E_2$ y $E_1 - E_0$, esta puede cambiar ligeramente para niveles intermedios energéticos inestables. Por lo tanto, la energía disponible para las emisiones a los niveles $E_2 \rightarrow E_1$ puede también variar ligeramente. De esta forma, es por estos niveles intermedios de energía que la que tiene el fotón de emisión láser varía en un rango de valores, dando lugar a que el espectro no sea perfectamente monocromático.

1.2.1. Cavidades ópticas

Hay distintas cavidades resonantes que se pueden diferenciar debido a sus configuraciones ópticas; dependiendo de la disposición de los espejos que compongan la cavidad, su reflectividad o incluso su curvatura. Luego a partir de las relaciones que tengan estos factores que componen la cavidad, se las puede dividir en dos grupos: las cavidades estables y las inestables. Las primeras son utilizadas para láseres que deben tener un haz continuo. Tienen la particularidad de que la intensidad del haz de luz no cambia durante su recorrido por la cavidad. Por otro lado, en las cavidades

inestables la intensidad del haz de luz disminuye, lo cual tiene como consecuencia que el haz no complete muchos recorridos por la cavidad. Estos láseres son particularmente útiles en láseres que funcionan en forma pulsada con medios amplificadores de gran ganancia.

Las condiciones para que una cavidad sea estable va a estar dada por la curvatura de los espejos y las distancias entre si. En particular para una cavidad de dos espejos, si cumplen la relación (1) se consideran estables. Cualquier otra configuración se considera inestable

$$0 \leq (1 - d/R_1)(1 - d/R_2) \leq 1 \quad (1)$$

Donde d es la distancia de los espejos y $R_{1,2}$ son los radios de cada uno de estos. De esta relación se nota que para espejos planos, es posible formar una cavidad lineal haciendo que sus caras reflectivas se enfrenten. En esta configuración, se puede aproximar al espejo plano como esféricos con radios muy grandes comparados con las distancias entre los espejos, haciendo que se puedan formar cavidades estables fácilmente al darse que $d \ll R_{\text{espejo plano}}$.

Otras cavidades de interés son las cavidades en V, las cuales agregan un espejo adicional a la configuración, de forma que ahora se deben de tener en cuenta dos distancias a y b entre los espejos que conforman la cavidad. Las relaciones de estabilidad en cavidades de esta configuración son mas sencillas de observar de manera gráfica, como en la Figura 3.

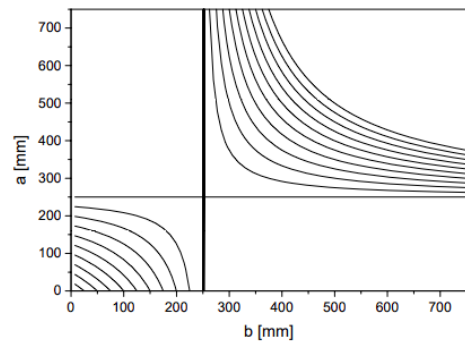


Figura 3: Curvas de estabilidad que indican las relaciones de las distancias características de los espejos en una cavidad en V. Imagen de [4]

Ahora bien, cuando se trabaja con una cavidad resonante estable, al tener un medio activo finito y espejos también finitos, no es posible que la luz dentro de la cavidad forme una onda estacionaria de la forma de una onda plana al no mantenerse

confinada. De todos modos, es posible demostrar que existen soluciones estacionarias para la distribución de las intensidades del láser. Estas están descritas por una familia de funciones se llaman TEM_{pq} (Modo Transverso Electromagnético de orden pq). Los subíndices pq son números enteros que indican el orden de los polinomios de Hermite que forman parte de la expresión analítica de la solución. Para el caso donde $p = q = 0$ la distribución de intensidades resulta gaussiana.

Teniendo en cuenta que para los experimentos ideados en este trabajo no es necesaria una expresión analítica de estas intensidades en particular, será suficiente entender como se comportan los modos transversales dependiendo del subíndice que posean. Estos se pueden ver esquematizados en la Figura 4.

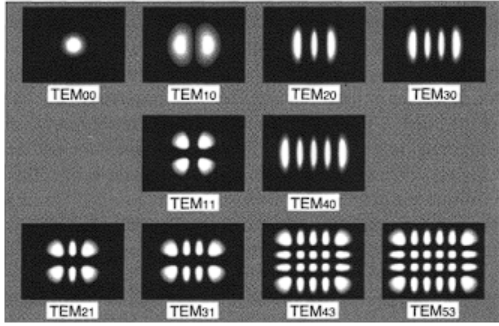


Figura 4: Esquema de la distribución de intensidades del láser generado en una cavidad estable. Imagen obtenida de [3]

El objetivo del trabajo es construir un láser de Nd:YAG y caracterizarlo a partir del estudio de su potencia, eficiencia y de su modo transverso electromagnético para distintas cavidades ópticas. Se estudia la potencia de salida en función de la potencia de bombeo para cavidades paralelo-plana y para una cavidad en V. También observan los primeros modos transversos electromagnéticos para la cavidad en V.

2. Desarrollo experimental

Como mecanismo de bombeo se empleó un diodo modelo *SDL 2371-P1*. El mismo contaba con un arreglo de lentes cilíndricas que enfocaban el haz que este generaba sobre el medio amplificador, el detalle de este arreglo se encuentra en la Sección 4 del Apéndice. Este arreglo era importante para corregir la divergencia que tenía el haz emitido por el diodo, y así poder concentrar la mayor parte de la energía de la emisión sobre el medio amplificador y garantizar que la emisión sea mas eficiente

al tener mayor intensidad de radiación por unidad de área.

Por otro lado, la potencia del diodo de bombeo era de aproximadamente 2W, y la longitud de onda de emisión, a una temperatura interna de 25°C, rondaba los 810 nm. Como la longitud de onda emitida fluctuaba alrededor de 0.3 nm por cada °C, se empleó una fuente externa reguladora de temperatura, que además protegía al diodo de sobrecalentamientos. Adicionalmente se utilizó una fuente externa de corriente (que permitía seleccionar corrientes de hasta 2.4 A de a pasos de 20mA) con la que se variaba la alimentación al diodo para poder regular la potencia del bombeo.

Como elemento amplificador se utilizó un cristal Nd:YAG cuya longitud de onda típica de emisión rondaba los 1064 nm. El cristal estaba encapsulado de manera tal que su extremo externo a la cavidad contaba con una lámina dieléctrica que transmitía alrededor del 99 % de la luz con longitud de onda de 810 nm, que era el caso de la luz incidente del bombeo, y reflejaba aproximadamente 99 % de la luz con longitudes de onda de 1064 nm, que era el caso de la luz emitida por el propio cristal. Esto hace que la mayor parte del haz de bombeo pueda entrar a la cavidad pero que la mayor parte del haz generado por el cristal no pueda salir de esta .

Por último, se trabajaron con dos sistemas de retroalimentación diferentes: cavidad lineal y cavidad en V. Ambas cavidades son estables. En las Secciones 2.1 y 2.2 se desarrollan cada una de estas.

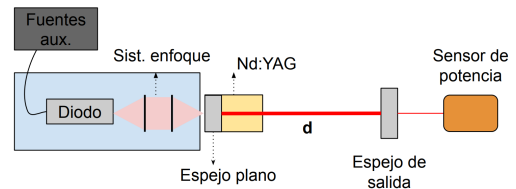


Figura 5: Esquema experimental utilizado para generar una cavidad lineal. Con una fuente de bombeo (diodo) se logra enfocar un haz de luz sobre un cristal Nd:YAG. El sistema cuenta con dos espejos: el primero, montado sobre el cristal, presenta una reflectividad $\approx 99\%$ para longitudes de onda de 1064 nm. En el otro extremo, situado a una distancia d del primero, está el segundo espejo. Este último se varió su reflectividad para que fuese 90 % y 98 % para longitudes de onda de 1064 nm. El haz de salida es medido con un sensor de potencia.

2.1. Cavidad lineal

Para generar la cavidad lineal se colocó un espejo plano, que se denominó *espejo de salida*, a una distancia $d = 10 \pm 0.1$ cm de manera que resultó paralelo al primer espejo. Se trabajó con dos reflectividades para el espejo de salida: 90 % y 98 %. Para adquirir la potencia emitida por el láser, alineado con el espejo de salida se dispuso de un sensor de potencia. El esquema resultante para la cavidad lineal se exhibe en la Figura 5.

Para lograr el funcionamiento del láser, fue indispensable alinear correctamente la posición de los espejos. Pero esto se dificultaba ya que la longitud de onda del láser no era visible al ojo humano. Por esto para la alineación del sistema se trabajó con un láser de He-Ne y dos espejos auxiliares. La disposición de estos espejos se observa en la Figura 6.

Para la alineación, primero se alineó el haz del He-Ne y los espejos auxiliares con el cristal, de modo que el haz se refleje volviendo al láser He-Ne por el mismo camino. Luego, se agregó el espejo de salida de modo que tanto el haz del He-Ne como sus reflexiones continúen volviendo sobre sí mismos. Una vez logrado esto se situó el detector de potencia como muestra la Figura 5. Modificando ligeramente la posición del espejo de salida, se finalizó la alineación una vez que el detector indicaba máxima potencia.

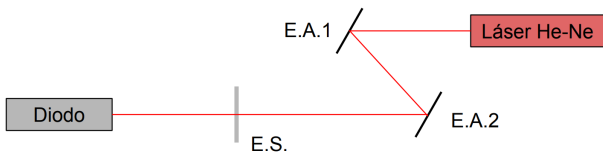


Figura 6: Esquema de la calibración para la cavidad lineal. Se sitúan dos espejos auxiliares $E.A.1$ y $E.A.2$ de manera que las reflexiones de un haz de luz generado por un láser auxiliar de He-Ne resulten alineadas, y que el espejo de salida $E.S.$ sea perpendicular al cristal Nd:YAG.

2.2. Cavidad en V

Para generar la cavidad en V se agregó un nuevo espejo a la configuración de la cavidad, el mismo consistió en un espejo cóncavo con un radio de curvatura $R=50$ cm, situado a una distancia $a = (22.0 \pm 0.1)$ cm del medio amplificador y una reflectividad del 100 %. Además se situó un espejo plano de salida a una distancia $b = (9.0 \pm 0.1)$ cm del espejo cóncavo. La elección de estas distancias fue en búsqueda de obtener una cavidad estable, respetando lo indicado por la Figura 3. Nuevamen-

te se trabajó con reflectividades de 90 % y 98 % para el espejo de salida. Para adquirir la potencia emitida por el láser, alineado con el espejo de salida se dispuso de un sensor de potencia. El esquema resultante para la cavidad lineal se exhibe en la Figura 7.

Al igual que para la cavidad lineal, fue necesario ajustar precisamente la posición de los espejos. Al igual que con la alineación de la cavidad lineal, se trabajó con un par de espejos auxiliares y un láser de He-Ne. En este caso adicionalmente se empleó una placa con un pequeño orificio para facilitar la alineación de las reflexiones del espejo de salida con el espejo cóncavo (el sistema estaría correctamente alineado cuando ambas reflexiones atravesasen el orificio). El sistema de alineación se muestra en la Figura 8.

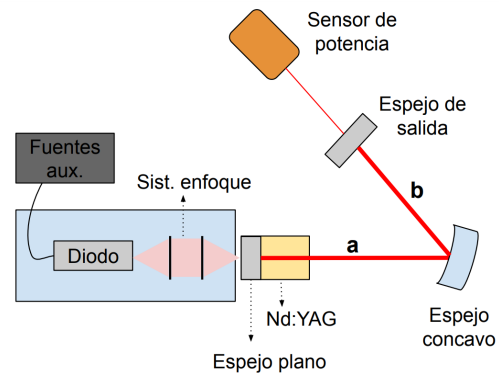


Figura 7: Esquema experimental utilizado para generar una cavidad en V. Con una fuente de bombeo se logra enfocar un haz de luz sobre un cristal Nd:YAG. El sistema cuenta con tres espejos: el primero, montado sobre el cristal, presenta una reflectividad ≈ 99 % para longitudes de onda de 1064 nm. A la salida de este se coloca un espejo cóncavo de $R = 50$ cm a una distancia a del primero. Por último se coloca un espejo plano a una distancia b del espejo cóncavo, de manera que las múltiples reflexiones vuelvan sobre sí mismas. Alineado con la salida de la cavidad se coloca un sensor de potencia.

El sistema quedaría correctamente alineado una vez que las múltiples reflexiones por los espejos, y las del He-Ne, volvieran sobre sí mismas. Finalmente, una vez producido el laseo, se terminó de ajustar la posición del espejo de salida hasta que el detector de potencia adquiriera el máximo de potencia.

2.3. Medición de la potencia

Para medir la potencia que generaba el láser, y también el diodo de bombeo, se empleó un sensor de potencia *Thorlabs PM100D* con un cabezal

modelo *S302C*. Para adquirir mediciones se buscó que la totalidad del haz incida sobre la zona de detección del instrumento en cuestión, con ayuda de una tarjeta sensible a longitudes infrarrojas para la alineación.

Para todas las mediciones de potencia realizadas, se adquirieron $N=20$ muestras las cuales el propio detector calculaba la desviación estándar σ y la media. La incerteza para la media resultó entonces $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ que luego sería propagada en cuadratura con el error de calibración del instrumento que según el fabricante era el 3% de la potencia [1]. Este último error de calibración, como se discutirá en la Sección de Resultados, será significativamente mayor que el error estadístico $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$.

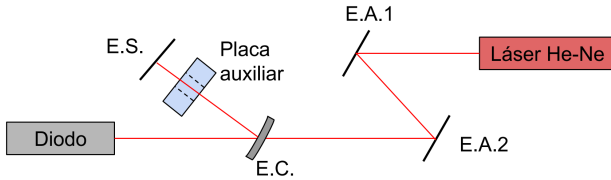


Figura 8: Esquema de la calibración para la cavidad en V. Se sitúan dos espejos auxiliares $E.A.1$ y $E.A.2$ de manera que las reflexiones de un haz de luz generado por un láser de He-Ne resulten y las múltiples reflexiones en los espejos vuelvan sobre si mismas. A la vez se emplea una placa con un orificio para facilitar la alineación.

2.4. Modos TEM

Por último con el láser funcionando en la cavidad en V, modificando ligeramente la posición del espejo cóncavo, se generaban condiciones de contorno tales que permitieron visualizar los primeros modos TEM. Se registraron cada uno de estos a través de una foto (tomada con la cámara de un celular), y luego a través del software de *ImageJ*[2] se representaron los perfiles de intensidad.

Para la adquisición de imágenes se utilizó una aplicación del teléfono que permitiese cambiar el tiempo de exposición. De esta forma, se aseguró que no sature en intensidades el sensor de adquisición.

Trabajando con una cavidad lineal, se observó únicamente el modo $TEM_{0,0}$. Para el análisis del perfil de intensidades además de realizar la fotografía del modo, se empleó un método mecánico que consistió en una rendija móvil que iba obstruyendo parcialmente el haz que le llegaba a un detector en este caso un fotodiodo. El mismo se desarrolla en profundidad en la Sección 4 del Apéndice.

3. Resultados

En este apartado se discutirán dos aspectos sobre las cavidades utilizadas para construir el láser de Nd:YAG. En primer lugar se caracterizará su eficiencia y se calcularán las potencias de bombeo necesarias para lograr el funcionamiento del láser de Nd:YAG P_L , es decir para producir su *laseo*. En segundo lugar se analizará la sección transversal del haz cuando se utiliza una cavidad en V y la generación de diferentes modos al variar la longitud de los brazos de la misma.

3.1. Análisis de potencia y eficiencia

Todas las mediciones de potencia fueron registradas en función de la corriente con la que se suministraba al láser de bombeo, sin embargo, el objetivo es conocer la dependencia de la potencia del láser de Nd:YAG en función de la potencia de bombeo. Es por esto que en un primer lugar se procedió a caracterizar el láser de bombeo que se utilizó para excitar el cristal de Nd:YAG y así corresponder cada valor de la fuente de corriente con un valor de potencia de bombeo del cristal. Para esto se adquirió la potencia a la salida del láser de diodos variando la corriente de alimentación entre los extremos que la fuente lo permitiera $[0, 02; 2, 38]A$.

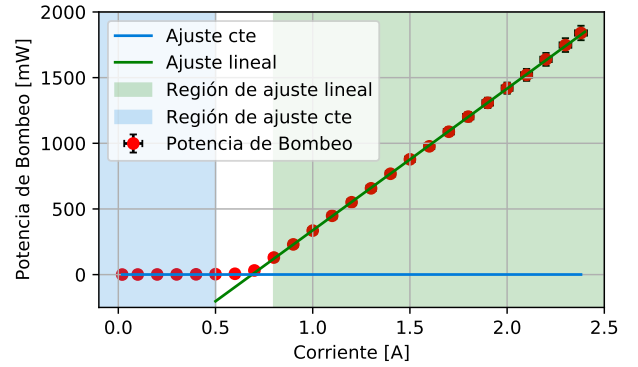


Figura 9: Mediciones de la potencia del láser de bombeo en función de la corriente de alimentación del mismo. Se realizaron dos ajustes, uno constante y uno lineal, utilizando para cada uno los datos demarcados por las regiones celeste y verde respectivamente.

Los resultados se observan en la Figura 9, donde se ajustaron las mediciones en la región celeste por una constante y luego los datos en la región verde por una lineal. A partir de la intersección entre estas curvas y sus bandas de error de $68\%CL$ se obtuvo la corriente a la que comienza a lasear, que resultó ser $I_L = (0, 68 \pm 0, 04)A$. Del ajuste lineal,

para el que se usaron las mediciones de 0,8A en adelante, se obtuvo un $\chi^2_\nu = 0.03$ lo que habla de una sobrestimación del error de calibración pero también de que la suposición de linealidad en este tramo fue acertada. Por lo tanto se utilizará la curva resultante de este ajuste para corresponder las corrientes de alimentación con la potencia del láser de bombeo durante las subsiguientes mediciones del Nd:YAG y así conocer la dependencia de la potencia de salida en función de la potencia de bombeo.

Sin embargo, al realizar esto, debido a los altos valores de potencia para el láser de bombeo y su error de calibración asociado del 3 %, se introduce una incerteza significativa en el eje horizontal de los gráficos de potencia de salida del Nd:YAG que aumenta linealmente con la potencia de bombeo. Este fenómeno se deberá tener en cuenta a la hora de informar las potencias de láseo para las diferentes cavidades.

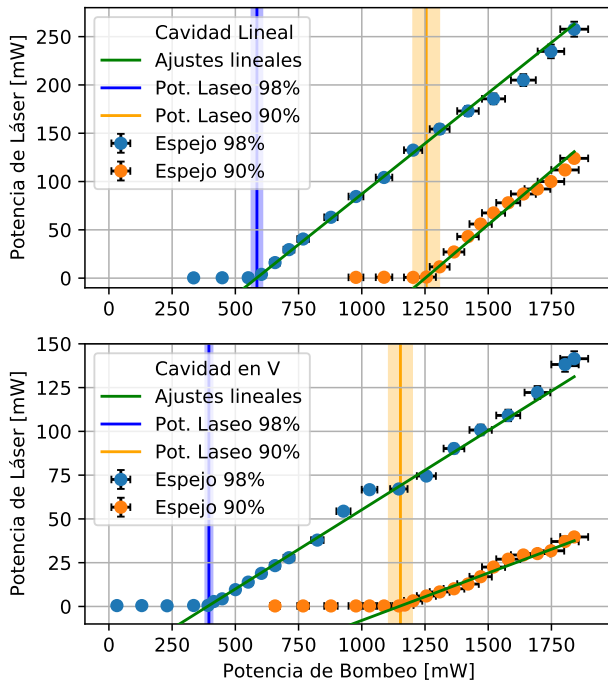


Figura 10: Mediciones de potencia del láser de Nd:YAG a la salida de cada una de las cavidades en función de la potencia de bombeo. Se ilustran en verde los ajustes lineales con los que se hallaron los valores de potencia de láseo P_L demarcados con líneas verticales con sus franjas de incerteza.

En la figura 10 se observan las mediciones de potencia del láser de Nd:YAG a la salida de cada una de las cavidades utilizadas para los espejos de 98 % y 90 % de reflectividad. Con el objetivo de calcular la potencia de bombeo a la que se comienza a producir el láseo P_L para cada cavidad se siguió el mismo procedimiento que para la obtención de la

corriente de láseo del láser de bombeo. Se ajustó cada curva de la Figura 10 por una constante en un primer tramo y por una lineal en el último, por claridad sólo se ilustran los ajustes lineales. Con la intersección de ambos ajustes se obtuvo P_L , sin embargo para el error de esta magnitud en todos los casos predominó la incerteza dada por el eje horizontal de potencia de bombeo frente al criterio de intersección de bandas de error de los ajustes. Los valores obtenidos de P_L para cada cavidad se informan en la Tabla 1.

Espejos	Cavidad Lineal	Cavidad en V
98 %	$(585 \pm 21)mW$	$(395 \pm 14)mW$
90 %	$(1254 \pm 51)mW$	$(1152 \pm 46)mW$

Tabla 1: Valores de potencial de bombeo necesario para producir láseo P_L en cada cavidad.

En los gráficos de la Figura 10 se hace evidente que las cavidades que poseían un espejo de salida del 90 % presentaron potencias de salida menores que las de 98 % bajo una misma potencia de bombeo, requiriendo también de una mayor potencia para lograr láseo y por lo tanto $P_{L,90\%} > P_{L,98\%}$. Esto es debido a que el espejo de 98 %, al tener una mayor reflectividad dentro de la cavidad, la retroalimentación de la emisión estimulada del cristal es mayor y por lo tanto dentro de la cavidad aumenta la intensidad del haz lo que genera un láseo más temprano. Por otra parte, se observa que a pesar de la menor transmisión del espejo de 98 % hacia el exterior de la cavidad, este presenta una mayor potencia en el haz de salida. Esto es debido a que el aumento en intensidad dentro de la cavidad por la mayor retroalimentación compensa por la disminución de transmisión hacia fuera de esta. Se retomará este asunto más adelante cuando se analicen las curvas de eficiencia.

Por otra parte, resulta llamativo el hecho de que para cada espejo, la cavidad en V logró láseo antes que su contrapartida lineal, es decir que $P_{L,lineal} > P_{L,V}$. A pesar de esto, hacia valores mayores de potencia de bombeo la cavidad en V presenta menor potencia que la lineal. En el presente informe no se logra llegar a una explicación para estos fenómenos pero podrían relacionarse con que el espejo cóncavo enfoque el haz en un área pequeña del cristal haciendo que la intensidad por unidad de área sea mucho mayor que en la cavidad lineal para la misma potencia de bombeo. Esto incitaría a un láseo más temprano pero también produciría que a mayores potencias sature la emisión estimulada en ese punto del cristal

al no estar bien distribuido el haz sobre este y por ello se obtenga una menor potencia total.

Para cerrar este apartado solo queda calcular las curvas de eficiencia para cada variación de la cavidad. Para esto simplemente se dividen las potencias del láser de Nd:YAG por su correspondiente potencia de bombeo, lo cual lleva a la Figura 11. En esta se distinguen los mismos patrones que fueron discutidos para las potencias, y se puede observar que las cavidades en V tienen menor eficiencia que las lineales para una misma potencia de bombeo, esto puede deberse a la saturación del cristal previamente descrita o a su dificultad para su correcto alineamiento y este es un aspecto que se podría optimizar.

La cavidad más eficiente resulta ser la lineal con el espejo de 98 % pero la que produce laseo a la menor potencia de bombeo es la cavidad en V con ese mismo espejo de salida. Como era de esperar por la figura 10, las cavidades con el espejo de salida de 90 % presentan una menor eficiencia comparado con las de 98 %.

Se tiene de hipótesis que esto se debe a que para las cavidades armadas; existe una relación entre la eficiencia (que comprende efectos de pérdida de haces de luz o imperfecciones de alineamiento) y la reflectividad que maximiza las potencia de los haces de salida. Pudiendo extrapolar en este caso que la reflectividad de máxima eficiencia se encuentra entre 90 % y 100 %, pero que al no tener mas espejos de varias reflectividades, no es posible resolver la cantidad exacta.

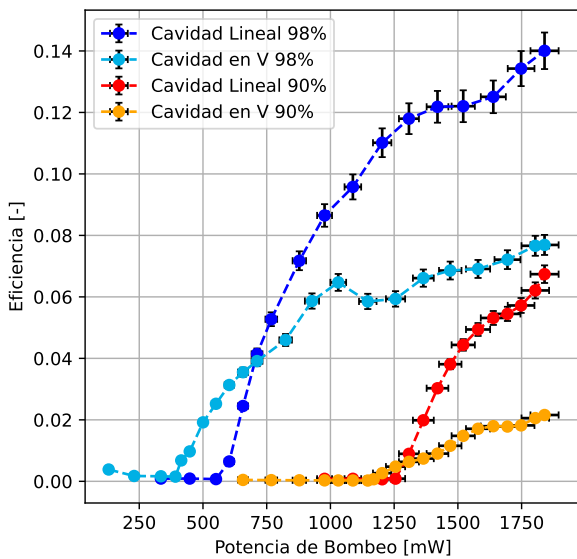


Figura 11: Eficiencia obtenida a la salida de cada una de las cavidades en función de la potencia de bombeo.

Algo destacable también es que en ninguno de los casos se llega a alcanzar una potencia de bom-

beo de máxima eficiencia. Una posible mejora a este experimento sería utilizar una fuente de corriente y un láser de bombeo que permitan alcanzar potencias de bombeo mayores para lograr dilucidar qué es lo que sucede más allá de lo que alcanza a mostrarse en la Figura.

3.2. Estudio de Modos TEM

Con el láser funcionando con la cavidad en V, tal como se describió en la Sección 2.2, se modificaron sutilmente las distancias a y b para cambiar las condiciones de contorno del sistema de manera de poder visualizar diferentes modos transversos electromagnéticos (TEM) de orden p y q . Para analizar los modos TEM se hizo incidir el haz de salida contra una pantalla donde se podían visualizar los mismos con el objetivo de fotografiarlos para su posterior análisis.

Se empleó la herramienta de promediado espacial de intensidades de *ImageJ* que adquiere el perfil de intensidad a lo largo de algún eje o franja arbitraria de una imagen, promediando espacialmente en el caso de la franja, por lo que no se consideró aplicar un filtrado a los datos (por ejemplo un filtro de suavizado de datos).

Los modos que se pudieron distinguir con mayor claridad fueron los correspondientes a $q = 0, 1, 2$ y $p = 0, 1, 2$. Los modos correspondientes a $q, p = 3$ se lograron observar pero la calidad de la foto no permitió obtener un perfil de intensidades comparables con lo esperado según el modelo.

En la Figura 12 se presentan los modos TEM_{pq} obtenidos.

Se obtuvieron resultados que coinciden con el modelo teórico, reproduciendo comportamientos similares a los de la Figura 4. Para el caso de las Figura 12 d) y e) se observó que las intensidades de los perfiles eran diferentes cuando en realidad, por la simetría de los polinomios de Hermite frente a $x \rightarrow y$ deberían ser iguales. En particular se observa que la relación entre el tamaño del pico intermedio con los picos de los extremos son diferente para estos dos perfiles. Podemos explicar esto ya que puede estar ocurriendo una transición entre los modos $p = 1, q = 0$ y $p = 2, q = 0$ y de la misma forma para sus análogos verticales, de forma que no estaríamos observando en alguno de estos casos el modo puro sino una transición.

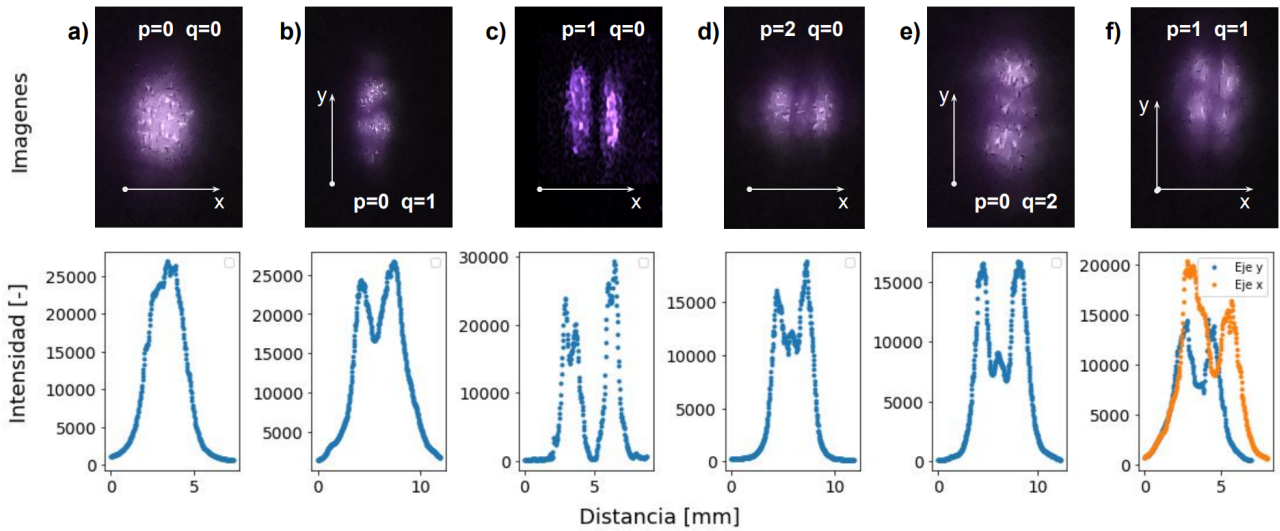


Figura 12: Modos TEM_{pq} observados. En la región superior se observan las fotografías del haz incidiendo sobre la pantalla, y en la región inferior los perfiles de intensidades en unidades adimensionales. En cada figura se agregó un eje que indica la dirección sobre la que se calculó el perfil de intensidades. Para el caso del modo $TEM_{1,1}$ (f) se representaron los perfiles en las direcciones dadas por los ejes x e y .

4. Conclusiones

En el presente trabajo se discutieron los mecanismos de funcionamiento y armado de cavidades láser de Nd:YAG lineales y en V para su posterior caracterización. Para esto se registraron las curvas de potencia de salida de la cavidad en función de la potencia del láser de bombeo para las configuraciones mencionadas comparando espejos de salida de 98 % y 90 % de reflectividad. Se observó que para ambos tipos de cavidades al utilizar espejos de 98 % se conseguía producir el laseo para menores potencias de bombeo y a su vez presentaban una mayor potencia de salida, y eficiencia, que sus contrapartidas con espejos de 90 % de reflectividad. Esto es debido a que los espejos de 98 % presentan una mayor retroalimentación y por lo tanto intensidad dentro de la cavidad contrarresta la disminución en porcentaje de transmisión hacia el exterior de la cavidad.

Por otra parte, utilizando la cavidad en V con el espejo de 98 % de reflectividad, se observaron siete modos transversos electromagnéticos (TEM) en el perfil del haz de salida. Esto se logró variando la longitud de los brazos de la cavidad pero simplemente modificando el ángulo de incidencia sobre el espejo convergente que se encontraba entre los dos brazos. Se observó que las intensidades se correspondían con los perfiles predichos teóricamente.

Referencias

- [1] HOJA DE DATOS MEDIDOR DE POTENCIA, *S302C Thermal Power Head Spec Sheet*, <https://www.thorlabs.com/drawings/S302C-SpecSheet.pdf>
- [2] SCHNEIDER, C. RASBAND W, *ImageJ Software*, 2012
- [3] SILFVAST, WILLIAM T., *láser Fundamentals*, (2004)
- [4] PRACTICA DE LÁSERES, LABORATORIO 5, http://materias.df.uba.ar/l5a2023v/files/2023/02/láser_Guia.pdf
http://materias.df.uba.ar/l5a2023v/files/2023/02/láser_OtrasCavidades.pdf

Apéndice

Sistema de enfoque diodo láser

El perfil del haz de salida del diodo de bombeo es rectangular (aproximadamente $1\text{ }\mu\text{m} \times 200\text{ }\mu\text{m}$). Por difracción, la salida en la dirección más angosta es más divergente y además tiene un perfil gaussiano; en cambio la otra dirección tiene un comportamiento que sigue las leyes de la óptica geométrica. A la salida del diodo, hay una lente colimadora (C0) de distancia focal $f=6\text{mm}$. Esta lente tiene la función de colimar uno de los planos (el de $1\text{ }\mu\text{m}$) pero no al otro. Luego de colimar al haz del diodo, se enfoca en el medio amplificador.

Por otro lado, la lente C1, tiene la función de enfocar al plano de $1\text{ }\mu\text{m}$. Las lentes C2 y C3 forman imagen del plano de $200\text{ }\mu\text{m}$.

El arreglo se ve esquematizado por la Figura 13

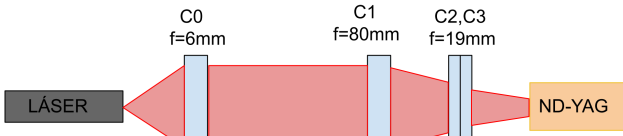


Figura 13: Esquema del arreglo empleado para enfocar el diodo de bombeo, visto desde arriba. Se utilizan 4 lentes C0, C1, C2 y C3 ubicandolas en las respectivas distancias focales para dirigir el haz divergente del láser de bombeo, hacia el cristal del medio amplificador que en este trabajo fue ND-YAG.

Donde la distancia focal efectiva para la lente C3 es de 9.5 mm . Aproximadamente la distancia entre el láser y C0 fue de 6mm (la distancia focal).

Perfil de intensidades empleando una rendija

Para la medición del perfil de potencias, se interpuso entre el espejo de salida y un fotodiodo como detector una rendija que podía ser desplazada con pasos finos (pasos de $\frac{1}{50}\text{ mm}$) de modo que obstruía parcialmente el haz que le llegaba al detector, como indica la Figura 14.

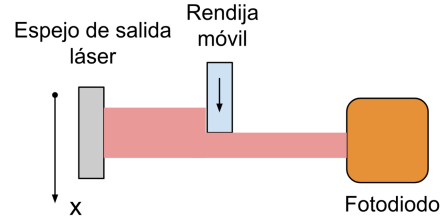


Figura 14: Sistema mecánico para obtener perfiles de intensidad. Se interpone una rendija móvil entre el haz de salida del láser y el detector de potencia. Se emplea un sistema de regulación que permite conocer la posición x del filo de la rendija.

Se fue variando la posición de la rendija y con un fotodiodo modelo *Thorlabs DET10A* conectado a un osciloscopio se adquirieron las mediciones de voltaje que eran proporcionales a la intensidad. Se esperaba observar un modo $\text{TEM}_{0,0}$ (es decir un perfil de intensidades gaussiano para la variable x), por la manera en que se desplazaba la rendija, de alguna manera el detector estaba integrando dicha distribución, por lo que las mediciones seguirían la distribución acumulativa de una gaussiana, es decir una ERF. Donde:

$$\text{ERF}(x) = \frac{1}{2\pi\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt(2)$$

Se realizó entonces un ajuste por cuadrados mínimos a las mediciones para obtener los parámetros μ y σ de la distribución gaussiana que provenían. Dicho ajuste se observa en la Figura 15.

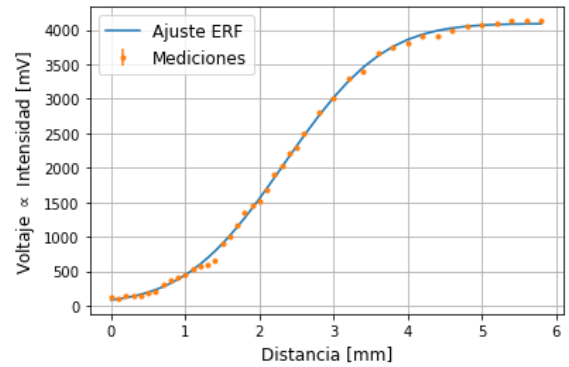


Figura 15: Ajuste por cuadrados mínimos de una ERF.

Se obtuvo que $\mu = 2,3 \pm 0.1$, y $\sigma = 0.98 \pm 0.02$. Adicionalmente, se tomó una fotografía al spot del láser, para analizarla digitalmente y comparar ambos métodos. Para una mejor visualización se re-escalaron ambos gráficos para poder compararlos cualitativamente, y se observó una semejanza entre ambos métodos que se ve reflejada en la Figura 16.

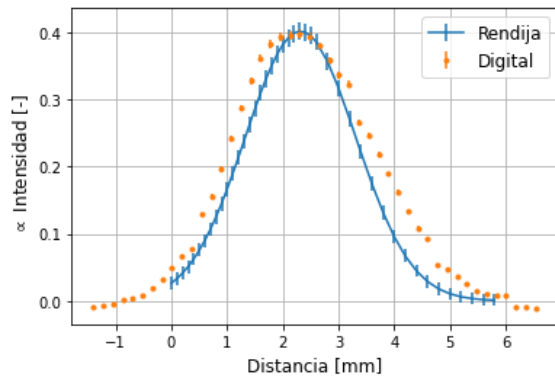


Figura 16: Comparación del perfil de intensidades tanto para el método de la rendija como para el método de análisis digital de la fotografía.

Se notó la semejanza cualitativa de ambas curvas, la calidad de la fotografía pudo haber influido en la dispersión de los datos por ende aumento el σ de la distribución.

En parte este resultado motiva a trabajar con métodos digitales ya que resultan más rápidos que el método de la rendija que además requiere de un montaje especializado para el paso fino del desplazamiento de la rendija.