

Armado y caracterización de un Láser

Luciano Carullo Bedia
luchibedia@gmail.com

Tadeo Rodríguez
tadeorodriguez842@gmail.com

Joaquín Sequeira
joaquinetsequeira@gmail.com

*Laboratorio 5, Cátedra Grosz, Departamento de Física, Facultad de Ciencias
Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires*

4 de Noviembre, 2024

Resumen

El objetivo de este trabajo es el armado y la caracterización de un láser Nd:YAG. Se buscará armar el láser con dos cavidades resonantes distintas; una lineal y una en forma de “V”. Para ambas cavidades se buscará caracterizar emisión. Mientras que para la cavidad lineal se analizará la intensidad del haz sin alterar el sistema, para la cavidad en “V” se inducirán pérdidas, buscando observar los modos TEM_{pq} . Por último, se buscará estudiar el comportamiento de un cristal no lineal KTP. Para esto se analizará el espectro de longitudes de onda del láser luego de incidir sobre el cristal.



1. Introducción

Los láseres revolucionaron numerosas áreas de la ciencia y la tecnología, y tienen aplicaciones que van desde la medicina y la industria hasta la comunicación y la investigación científica. La utilidad de los láseres se basa en la capacidad de emitir luz coherente, altamente localizada y con un ancho espectral angosto.

El funcionamiento de un láser requiere la integración de varios componentes. En primer lugar, el sistema de bombeo, que proporciona la energía necesaria para excitar las partículas del medio activo. En el medio activo es donde se produce la amplificación de la luz. Esta amplificación se basa en los fenómenos de inversión de población y de emisión estimulada. El bombeo genera que ~~e~~^{más} electrones del medio activo se ubiquen en niveles energéticos más altos. La emisión estimulada es el proceso mediante el cual un fotón interactúa con un electrón excitado. Esto provoca que el electrón caiga a un nivel de energía más bajo y a su vez genere otro fotón con fase, frecuencia, polarización y dirección de desplazamiento idénticas al fotón incidente. Es por esto que el haz del láser sale colimado y coherente. Por último, para aumentar la ganancia del sistema, los láseres suelen contar con una cavidad óptica resonante, dentro de la cual se coloca el medio activo. Esta cavidad actúa como fuente de realimentación, ya que con cada paso del haz por el medio activo, la emisión de fotones aumenta.

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. Las condiciones de estabilidad de las cavidades láser son esenciales para garantizar un funcionamiento eficiente, y dependen de factores como la distancia, el foco y la curvatura de los espejos. A la salida de la cavidad se coloca un espejo que tenga una reflectividad menor que el 100 por ciento, de tal manera que parte de la luz que está en resonancia salga en forma de haz colimado. Se puede ver en la figura 1 un esquema general.

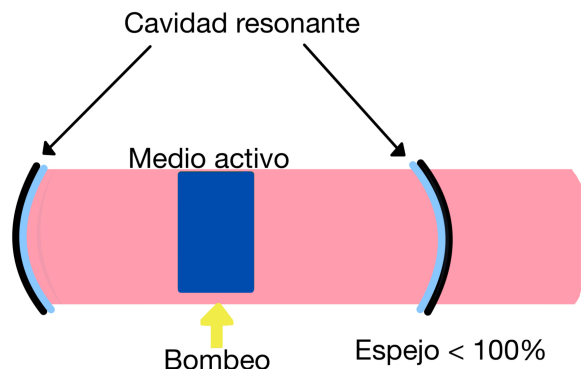


Figura 1: Esquema de los elementos fundamentales de un láser: la fuente de bombeo, el medio activo, y la cavidad resonante. Se ve el espejo a la salida con reflectividad menor al 100 por ciento.

En el estudio del láser es necesario tener en cuenta las condiciones que impone la cavidad. Por ejemplo, al estar conformada por elementos con diámetro finito (tanto el medio activo como los espejos), las soluciones de las ecuaciones del campo electromagnético no serán ondas planas. Se puede demostrar que para cavidades con espejos de diámetro finito, el campo electromagnético dentro de la misma tendrá una distribución de intensidades dada por funciones llamadas TEM_{pq}[1].

$$I(x, y, z) = I_0 \left| H_p \left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)} \right) H_q \left(\frac{\sqrt{2}y}{w(z)} \right) \right|^2 e^{-2\left(\frac{x^2+y^2}{w(z)^2}\right)} \quad (1)$$

En esa expresión p y q son números enteros que indican el orden de los polinomios de Hermite que forman parte de la solución. $w(z)$ es el parámetro relacionado con el ancho del haz, que depende de z (La distancia a la pantalla) y I_0 está relacionado con la intensidad del haz. Es importante aclarar que el láser trabaja en un régimen de ganancias y pérdidas, de modo que aunque todas las soluciones de polinomios de Hermite sean válidas, la que mayor relevancia tenga será aquella que genere mayor ganancia. En general los láseres funcionan en el modo TEM₀₀, cuya expresión es la de una Gaussiana.

La integral del haz en la posición da como resultado la función:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (2)$$

Viendo 1, se puede ver que cuando el haz tiene forma gaussiana (TEM₀₀) el parámetro w está relacionado con la desviación estándar de la gaussiana según la siguiente expresión.

$$w = 2\sigma \quad (3)$$

con A la intensidad, b el valor medio de la intensidad y σ la desviación estándar. En la figura 2 pueden verse esquematizados algunos de los modos TEM_{pq}.

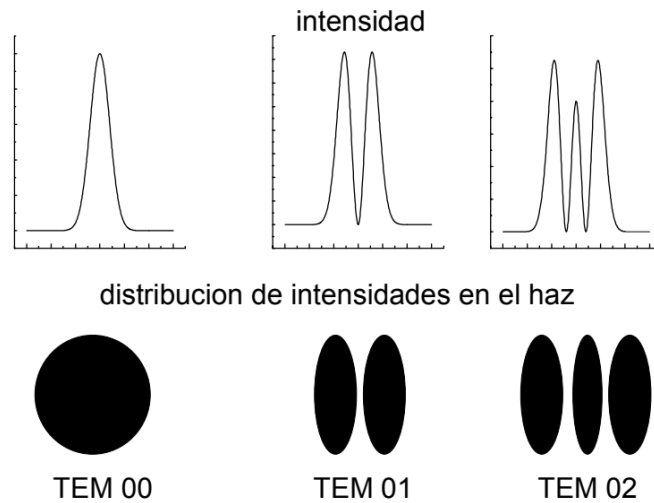


Figura 2: Se pueden ver los distintos modos TEM_{0q}, que representan la distribución de intensidad del campo dentro de la cavidad para el modo 0 en la dirección vertical. Los modos TEM_{pq} se comportan de la misma forma en ambas direcciones. Para el modo TEM₀₀ la solución es una distribución de intensidad Gaussiana.

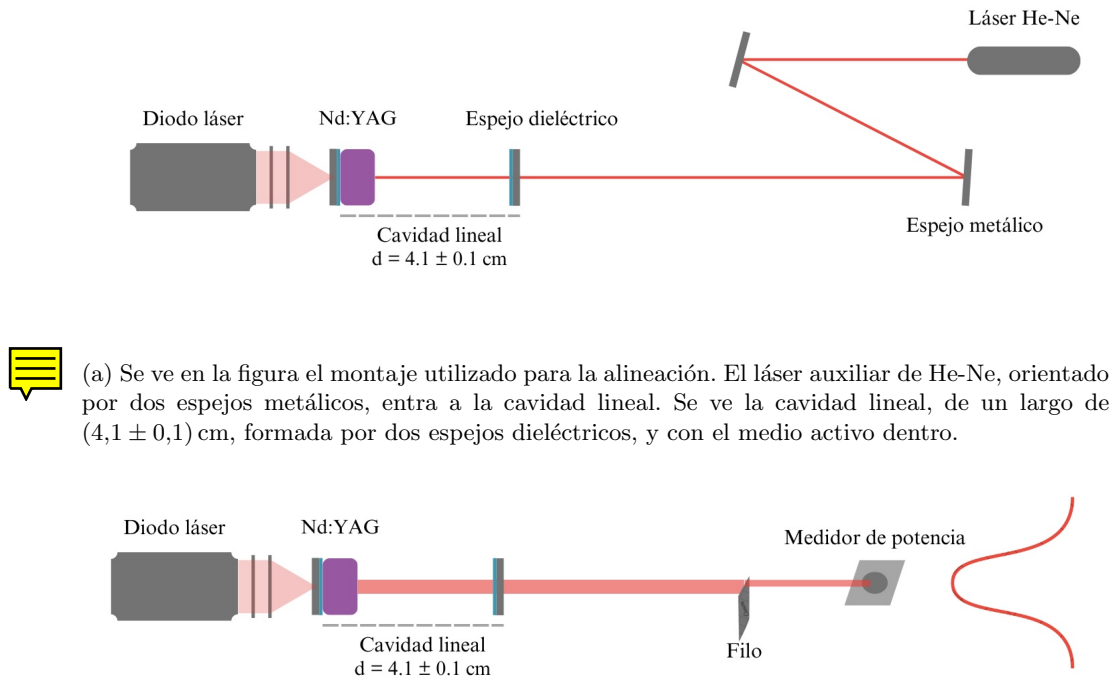
Existe un área de la óptica que estudia fenómenos no lineales, para los cuales no puede aplicarse el principio de superposición. Un elemento cuyas propiedades se explican con este campo son los cristales KTP, que funcionan como un material birrefringente con un eje ordinario y uno extraordinario. Estos cristales permiten observar un fenómeno llamado “generación de segundo armónico” que consiste en la generación de dos fotones de la mitad de la frecuencia del fotón incidente.

El objetivo de este trabajo es caracterizar un láser con un medio activo Nd:YAG. Se usarán además dos cavidades distintas, una lineal y una con disposición en forma de “V”. Para la cavidad lineal, además, se estudiará el modo de emisión normal. Se buscará confirmar que la distribución en ese caso es Gaussiana. Para el caso de la cavidad en “V” se inducirán pérdidas, para estudiar cómo cambia la intensidad a la salida del láser. Se buscará encontrar para distintos casos, si la distribución corresponde a algún modo TEM. Por último, se utilizará a la salida del láser un cristal KTP. Usando el láser Nd:YAG, de longitud de onda 1064 nm, se buscará confirmar la generación de segundo armónico mediante la observación de un haz con 532 nm.

2. Desarrollo experimental

Para llevar adelante el experimento se utilizó un bombeo óptico, usando como fuente un diodo láser. El medio activo a lo largo de toda la experiencia fue un cristal Nd:YAG. La primera parte del trabajo fue con la cavidad resonante en forma lineal. El esquema y las distancias utilizadas se pueden ver en la figura 3(a). El láser de bombeo pasaba por un espejo dieléctrico a la entrada de la cavidad lineal. Los espejos dieléctricos tienen una reflectividad menor para la longitud de onda del bombeo (aproximadamente 850 nm) pero una reflectividad cerca del 100 % para el haz de 1064 nm que emite el medio activo. Este primer espejo recubría la parte exterior del cristal Nd:YAG, y tenía una reflectividad del 99,9 % para el haz del medio activo. A la salida de la cavidad se coloca otro espejo dieléctrico, pero con 98 % de reflectividad.

Para que una cavidad sea resonante resulta importante que esté alineada. Para alinearla se utilizó un láser He-Ne como elemento auxiliar junto con un sistema de dos espejos metálicos planos. El haz del láser auxiliar se orientó de tal forma que ingresara a la cavidad lineal, y que la reflexión volviera por el mismo camino óptico. Además, se hizo que el eje del cristal coincidiera con la dirección del haz auxiliar. Una vez alineada la cavidad, se prendió el bombeo y se midió la potencia a la salida de la cavidad con un medidor de potencia térmico *Thorlabs S302C*. Con la cavidad lineal laseando, se colocó un filo de gillette sobre un microposicionador, para tapar progresivamente el haz y estudiar como cambiaba la potencia registrada en función de la posición de la gillette. Esto se ve en la figura 3(b)



- (a) Se ve en la figura el montaje utilizado para la alineación. El láser auxiliar de He-Ne, orientado por dos espejos metálicos, entra a la cavidad lineal. Se ve la cavidad lineal, de un largo de $(4,1 \pm 0,1)$ cm, formada por dos espejos dieléctricos, y con el medio activo dentro.

- (b) Se ve el esquema para la medición con el filo de gillette.

Figura 3

Luego del estudio de la cavidad lineal, se procedió a armar la cavidad con disposición en forma de “V”. Esta cavidad se armó con los mismos espejos dieléctricos a la entrada y la salida, pero sumando un espejo metálico curvo de tal forma de armar la “V”. Esto se puede ver, junto con las distancias utilizadas, en la figura 4. Para la alineación de esta cavidad no se usó el láser de He-Ne; se usó el láser de la cavidad lineal. Los brazos de la cavidad en “V” eran más largos que la cavidad lineal, de modo que, con la cavidad lineal laseando, se buscó que este láser recorra el mismo camino óptico, yendo y viniendo por la cavidad en “V”.

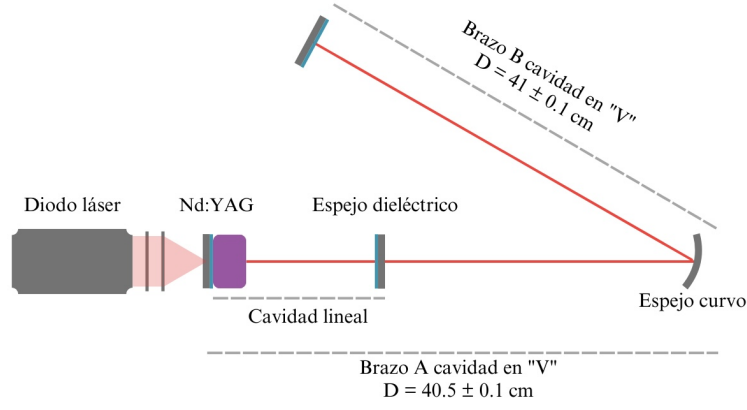


Figura 4: Se muestra en la figura el sistema utilizado para alinear la cavidad en 'V'. Se ve la cavidad lineal laseando, y el haz que sale de ella es lo que se utilizó para alinear. El haz que sale de la cavidad lineal es de 1064 nm, por lo que para alinear la cavidad fue necesario usar tarjetas que permitieran ver el infrarrojo. Los largos de los brazos se eligieron de acuerdo a las condiciones de estabilidad, teniendo en cuenta que el espejo curvo tenía un radio $R = 50$ cm.

Una vez que la cavidad en 'V' estuvo alineada se desarmó la cavidad lineal. Con la cavidad en 'V' laseando, se volvió a medir la potencia a la salida. De nuevo se midió a la salida con el medidor de potencia térmico. La segunda experiencia que se realizó consistió en inducir pérdidas en la cavidad mediante la desviación del haz. Esto se consiguió variando la orientación de los espejos, sutilmente, con los tornillos micrométricos. La intención de la experiencia fue observar los modos TEM_{pq} , para lo cual se colocó a la salida del láser una lente divergente con foco $f = 12,5$ cm, que aumentaba el tamaño del haz. Se colocó una pantalla a 56 cm, y se tomaron fotografías con la cámara de un celular colocado a 5 cm. Este sistema puede observarse en la figura 5.

Por último, se retiraron la lente divergente, la pantalla y el celular, y se colocó a la salida del láser un cristal KTP, para observar la generación de segundo armónico. Se colocó una lente convergente, con foco de 100 mm, adelante del cristal, para que el láser de Nd:YAG se focalice en el cristal. El espectro se midió con un espectrómetro *ThorLabs CCS100*.

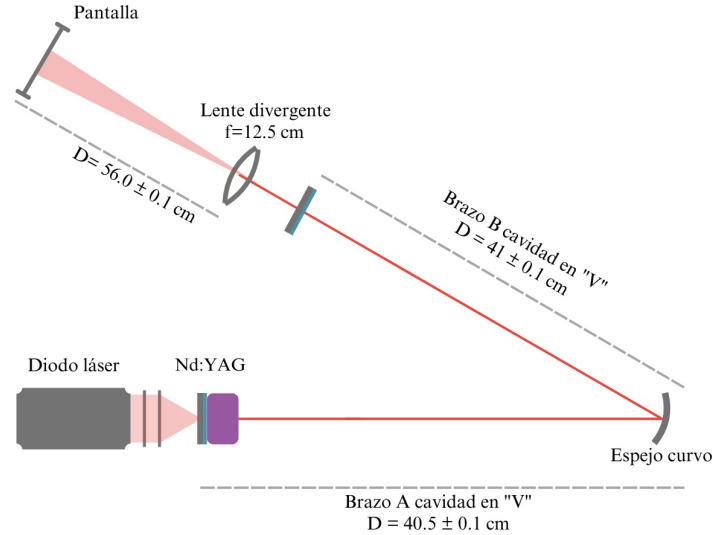


Figura 5: El sistema utilizado para observar los modos TEM. El espejo curvo contaba con posicionadores micrométricos, los cuales se variaban para inducir pérdidas en la cavidad. A 5 cm de la pantalla se colocó un celular, con una cámara que detectaba infrarrojo, para tomar las fotos.

3. Resultados

3.1. Cavidad lineal

Una vez armado el láser, se midió la potencia de salida para la corriente de entrada máxima 2,38 A, y se obtuvo $(295,0 \pm 0,5)$ mW. Luego, para analizar el perfil del láser para esta cavidad, se midió la potencia del láser tapando con un filo parte de su perfil. Para esta configuración, se esperaba que la intensidad en función de la posición tomase forma de una gaussiana, al predominar el modo TEM_{00} según la ecuación 1. Primero se ajustó la potencia en función de la posición del filo usando la función error (la integral de una gaussiana), de la ecuación 2. Esto se puede ver en la figura 6.

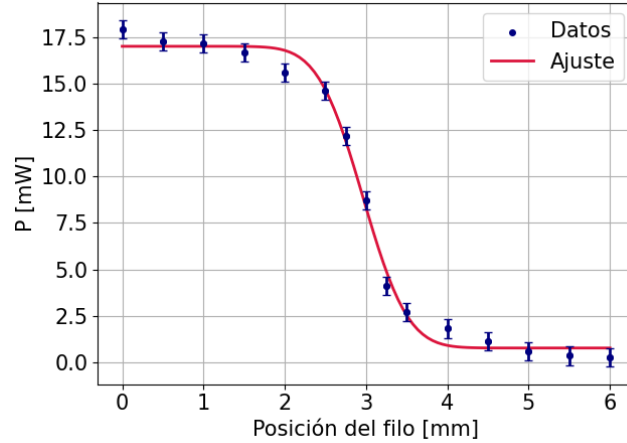


Figura 6: Se gráfica la potencia en función de la posición del filo. Se lo ajusta según la función error y se obtiene un $P_{valor} = 5,8\%$

Luego se derivó este ajuste analíticamente para obtener la gaussiana. Además se derivaron numéricamente los datos y se ajustaron por la gaussiana. Ambos métodos para obtener el perfil del haz se ven en la figura 7. Utilizando la fórmula 3, $\omega = (5,2 \pm 0,3)$ mm que es el ancho del haz.

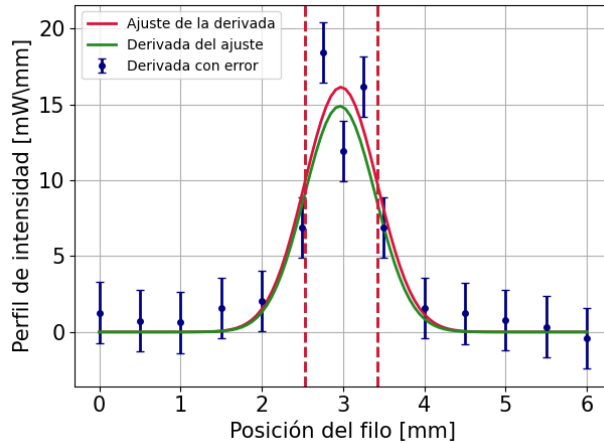


Figura 7: Se gráfica la derivada de la potencia en función de la posición en azul, en rojo el ajuste de estos puntos según una función Gaussiana y en verde la derivada del ajuste de la figura 6. En el ajuste se obtuvo un $P_{valor} = 27\%$. Las líneas verticales representan el ancho del haz y vienen dadas según 3

3.2. Modos TEM

Al armar la cavidad en forma de "V", se midió la potencia de salida para corriente máxima, y se obtuvo $(58,5 \pm 0,5)$ mW. Luego se analizaron los modos horizontales, es decir aquellos donde solo varía el orden del polinomio dependiente de x . Para analizar la intensidad que se captó en cada imagen se procesaron las imágenes aplicando un filtro gaussiano para suavizar las imperfecciones. A todos los modos se les trazó un perfil de

intensidad de una sola dimensión y se lo grafico en función de la posición como se puede ver en 8. Siguiendo la formula de la ecuación 1, se ajustó para cada uno de los modos obteniendo para cada uno un valor de ω .

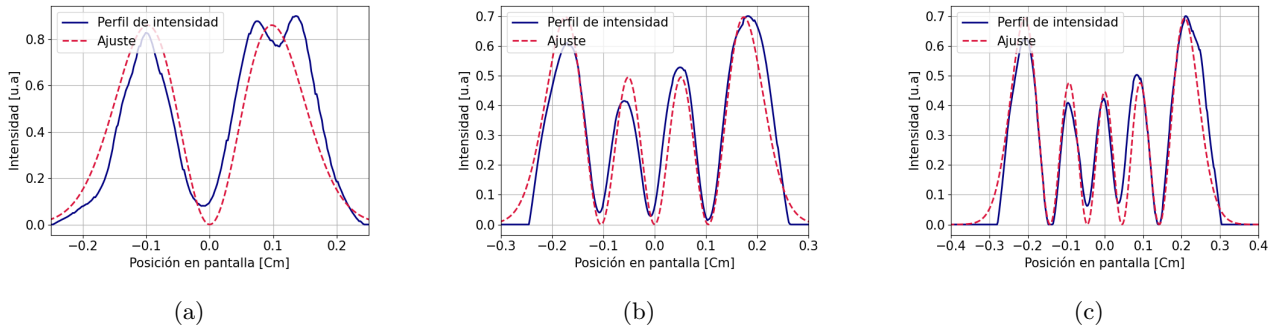


Figura 8: (a) Intensidad en función de la posición en la pantalla excitando el modo TEM_{01} , la línea punteada representa el ajuste obteniendo un valor $\omega = 0,132 \pm 0,015 \text{ cm}$. (b) Intensidad en función de la posición en la pantalla excitando el modo TEM_{03} , se obtuvo $\omega = 0,115 \pm 0,016 \text{ cm}$. (c) Intensidad en función de la posición en la pantalla excitando el modo TEM_{04} , se obtuvo $\omega = 0,123 \pm 0,010 \text{ cm}$

Se puede ver que los perfiles de intensidad siguen el comportamiento del ajuste. También se observó que los valores obtenidos de ω no presentan diferencias significativas entre sí, lo cual es coherente, ya que el valor de ω no depende del modo TEM. Estos indicativos, por más de que no permiten confirmar la teoría, generan confianza sobre lo que esperábamos ver.

Por otro lado se estudiaron los modos TEM variando la componente vertical y la horizontal. En la figura 9 se muestran las intensidades de cada uno de los pixeles en función de la intensidad.

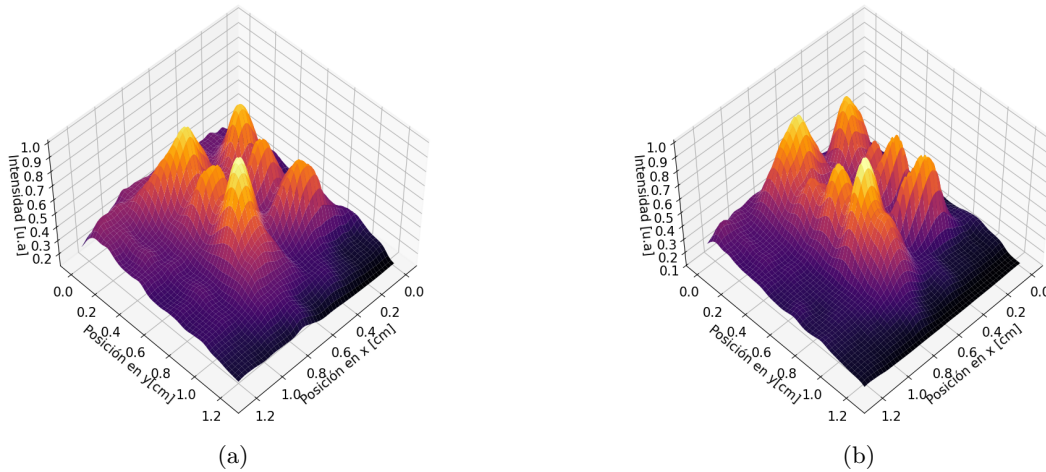


Figura 9: Se representa la intensidad captada en función de la posición en la pantalla. En (a) se observa el modo TEM_{12} , en (b) el modo TEM_{13} .

En la figura 9 se observan los modos TEM_{12} y TEM_{13} , en (a) y (b) respectivamente. Viendo la forma de 1, se puede ver que tanto la componente en x como en y son independientes entre sí. Si solo se mira una dimensión del gráfico se ven patrones similares a los de la figura 8. En la figura 9 se puede ver esto perfectamente exceptuando algunos picos más grandes de lo esperado.

3.3. Cristal KPT

Para el análisis del cristal KPT se midió el espectro de longitudes de onda luego del haz saliente del cristal. Una de estas mediciones se observa en la figura 10. El espectrómetro utilizado no llegaba a medir el espectro para longitudes mayores a los 1019 nm por lo que no se podía utilizar para medir la longitud de onda del láser al salir de la cavidad. Se esperaba que el cristal produjera un haz verde a la salida, con un único pico. Se encontró un pico con longitud de onda $\lambda_1 = (533,7 \pm 0,3) \text{ nm}$, que corresponde a los verdes, pero además se encontraron otros en $\lambda_2 = (480,4 \pm 0,3) \text{ nm}$ y $\lambda_3 = (586,9 \pm 0,2) \text{ nm}$. El mecanismo que hace que el cristal emita fotones con λ_1 es la absorción de un fotón, para luego emitir dos con la mitad de la longitud de onda (y energía). Esto indicaría que la longitud de onda emitida era $(1067,4 \pm 0,6) \text{ nm}$. De manera similar se puede explicar la aparición de fotones con las otras dos longitudes de onda, ya que $\lambda_2 + \lambda_3 = (1067,3 \pm 0,4) \text{ nm}$, valor que no

presenta diferencias significativas con el anterior. Esto permite considerar como hipótesis que el cristal no solo emitía pares de fotones con λ_1 al absorber uno del láser saliente de la cavidad, sino también pares con un fotón de λ_2 y otro de λ_3 .

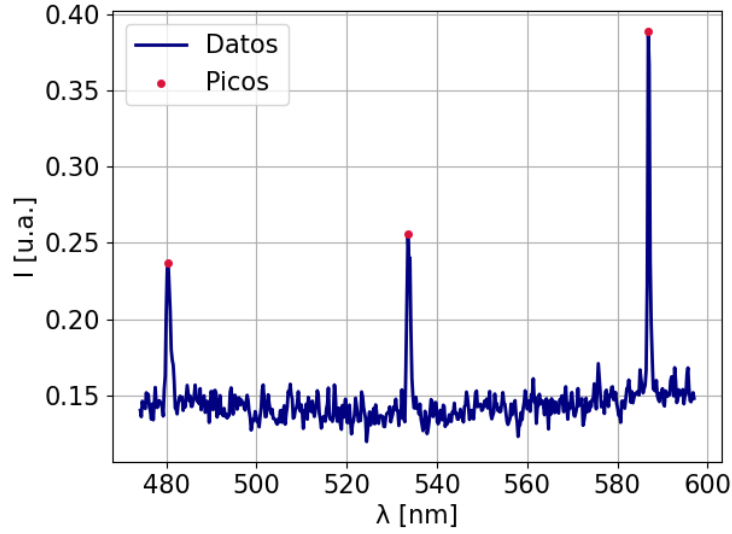


Figura 10: Se observa el espectro producido por el cristal kpt, se observan máximos en $\lambda_1 = (533,7 \pm 0,3)$ nm, $\lambda_2 = (480,4 \pm 0,3)$ nm y $\lambda_3 = (586,9 \pm 0,2)$ nm.

4. Conclusiones

El trabajo se planteó con dos objetivos; el armado y la caracterización de un láser Nd:YAG. Se logró armar el láser con dos cavidades distintas, lineal y en “V”. Para la primera se logró obtener una potencia máxima a la salida de $(295,0 \pm 0,5)$ mW, mientras que para la segunda se obtuvo $(58,5 \pm 0,5)$ mW.

La caracterización del láser consistió en analizar los modos de emisión. Se encontró en primer lugar que la cavidad lineal emite en el modo TEM_{00} , o en forma de gaussiana, encontrando entonces un ancho para el láser de $\omega = (5,2 \pm 0,3)$ mm. Por otro lado, se pudo caracterizar la respuesta del láser a las pérdidas inducidas en la cavidad en “V”. Se encontró que las distribuciones de intensidad del haz tienen un comportamiento que se corresponde con el de los modos TEM_{pq} . Ninguno de los ajustes permite confirmar que se trate de estos, pero esto es por la resolución y calidad de la cámara con la que se tomaron las fotos.

Por último, se estudió el comportamiento no lineal de la luz al pasar por un cristal KPT. Este resultado es probablemente el más curioso, ya que lo observado no se correspondió con lo esperado. Teóricamente el cristal debía generar un único haz secundario con longitud de onda de la mitad de la onda incidente, pero se observaron tres longitudes de onda distintas. La óptica no lineal es un tema que sobrepasa los fines de este trabajo, pero una hipótesis posible es que el cristal no solo emitía pares de fotones con λ_1 , sino también pares con un fotón de λ_2 y otro de λ_3 . Esta hipótesis se basa en el hecho de que se recupera la misma longitud de onda del haz incidente si se suman dos fotones con λ_1 o uno con λ_2 y otro con λ_3 .

Para mejorar la experiencia y la caracterización, se propone medir la intensidad a la salida del diodo láser (antes de incidir en el medio activo) lo cual permitiría obtener la eficiencia del láser. Además, mejorar la cámara permitiría desarrollar más confianza o rechazar la hipótesis de que lo que se ve son los modos TEM_{pq} .

Referencias

- [1] *Laser Resonator Modes*. <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/laser-resonator-modes/>.