

MODE-LOCKING EN LASER DE Nd:YAG BOMBEADO POR DIODOS LASER

M.A. Larotonda, A.A. Hnilo

Centro de Investigación en Láseres y Aplicaciones CEILAP (CITEFA-CONICET)
Zufriategui 4380 - (1603) - Villa Martelli - Buenos Aires - Argentina
e-mail: hnilo@udceilap.edu.ar, pucho@mate.dm.uba.ar

Se diseñó y construyó un láser de Nd:YAG bombeado por un diodo láser, así como el autocorrelador para medir la duración de los pulsos. Se montó una cavidad capaz de producir mode-locking (M-L) por efecto Kerr. Se obtuvieron pulsos de M-L activo de 9.1 ps FWHM a 100 MHz, con una potencia promedio de salida de 130 mW. La influencia del efecto de lente de Kerr se manifestó como un aumento de dos órdenes de magnitud en la zona de tolerancia de desintonía entre el largo de la cavidad y la frecuencia del modulador. Se discuten las razones por las que no se pudo alcanzar el M-L totalmente pasivo

A diode-pumped Nd:YAG laser was designed and built in this work, as well as the autocorrelator to measure the pulse duration. A laser cavity capable to produce the Kerr lens mode-locking (M-L) was mounted. 9.1 ps FWHM, 100 MHz active M-L pulses with 130 mW of average output power were obtained. The influence of the Kerr lens effect can be observed as a two orders of magnitude increase of the detuning tolerance region between the cavity length and the modulator frequency. The reasons that prevented the fully passive M-L operation are discussed.

I. INTRODUCCIÓN

Los láseres basados en materiales en medios activos en estado sólido tienen una serie de ventajas sobre aquellos basados en líquidos o gases, ya que poseen una robustez intrínseca y una vida operativa prácticamente infinita. Estas propiedades son eficientemente explotadas cuando se combinan con fuentes de bombeo de diodos láser. Estos tienen tiempos de vida útil de uno a dos órdenes de magnitud mayores que los de las lámparas clásicas de bombeo. Además, en el caso del Nd:YAG, existe un buen acople espectral de la emisión del diodo con las bandas de absorción del neodimio. Esto significa también una reducción de la cantidad de calor cedida al medio activo. Las principales ventajas de la combinación laser sólido-bombeo por diodos láser son su eficiencia, su gran confiabilidad y robustez, su versatilidad para funcionar tanto en modo continuo como pulsado y en pulsos cortos, y ser un sistema compacto y práctico de operar.

El efecto Kerr óptico ha comenzado a ser utilizado para producir mode-locking en láseres de estado sólido^(1,2). Se sabe que los haces láser intensos sufren un auto-enfoque cuando se propagan a través de un medio óptico con índice de refracción no lineal. Este efecto de auto-enfoque Kerr produce pequeños cambios en el perfil espacial del modo. Si existe además un efecto de abertura dentro de la cavidad se puede crear una pérdida dependiente de la potencia. En condiciones especiales este mecanismo de modulación de amplitud favorece una solución pulsada de alta potencia por sobre el funcionamiento continuo. Para esto, el sistema debe trabajar con la cavidad cerca del límite de estabilidad geométrica; la variación del tamaño del modo debido a la formación de la lente en este caso es máxima.

Debido al tiempo de respuesta casi instantáneo de la no linealidad de Kerr, la modulación de amplitud inducida por auto-enfoque es capaz de simular la acción de un absorbente saturable ultra-rápido y permitir la formación de pulsos de mode-locking. Este ingenioso método de generación de pulsos cortos no hace empleo de materiales degradables, no precisa ajuste de concentraciones como el M-L pasivo por absorbente saturable, y se basa en la inclusión de un elemento sólido con índice no lineal dentro de la cavidad. Fue propuesto y experimentado por primera vez por *Marconi*^(3,4), *Martínez*⁽⁴⁾ y *Diodati*⁽⁴⁾ en 1985 en el CEILAP-CITEFA. El efecto no lineal puede ser producido en un elemento adicional dentro de la cavidad⁽²⁾, o en el mismo medio activo^(1,5).

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La primera parte del trabajo consistió en montar el sistema de bombeo y enfoque. El láser de bombeo es un diodo láser SDL-2372-P1 de Spectra-Diode Laboratories, de 2 W de potencia máxima. Para coleccionar la radiación de salida, astigmática y muy divergente (32° en el plano perpendicular a la juntura del diodo y 12° en el plano paralelo a la juntura) se utilizó una lente colimadora específica para diodos láser de gran apertura numérica, con una distancia focal $f=6.5$ mm. Este haz se enfocaba mediante un sistema de lentes cilíndricas: una lente de $f=8$ cm para el plano perpendicular a la juntura del diodo y dos de $f=1.9$ cm en el plano paralelo a la juntura. Los tamaños de cintura medidos fueron $170 \mu\text{m}$ (plano perpendicular) y $70 \mu\text{m}$ (plano paralelo), con la lente de $f=8$ cm a 46 cm de la lente colimadora y 9 cm de distancia entre la primera y las dos lentes de $f=1.9$ cm.

El medio activo es un cilindro de Nd:YAG de 4 mm de diámetro y 10 mm de largo dopada con un 1% de Neodimio. Esta barra tiene sobre una de las caras una

capa antirreflejo para la longitud de onda de bombeo, 810 nm y una capa de alta reflectividad para la longitud de onda del neodimio: 1064 nm. Esta cara funciona como el espejo de fondo de una cavidad, que permite el bombeo longitudinal por el mismo. La otra cara tenía un tratamiento antirreflejo para 1064 nm. Se armó una cavidad plana de 8.5 cm de largo con un espejo de salida plano y de 98% de reflectividad y se alineó el sistema. Se obtuvo una pendiente de eficiencia del 44.6% con un umbral de laseo de 220 mW. Para 1.7 W de potencia de bombeo se obtuvieron 700 mW de potencia del láser de Nd:YAG, lo que significa una eficiencia óptica absoluta del 41%⁽⁵⁾.

Para optimizar el acople de la longitud de onda de bombeo con la banda de absorción de 810 nm del Neodimio, se levantó una curva de potencia del láser Nd:YAG en función de la temperatura del baño térmico del diodo. La variación de la longitud de onda de emisión del diodo con la temperatura es de aproximadamente 0.3 nm/°C. El control de temperatura se efectúa mediante un termistor y una celda termoeléctrica incluidas en el módulo del diodo. La temperatura óptima de funcionamiento del sistema se fijó en $(23 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ como se deduce del gráfico de la figura 1.

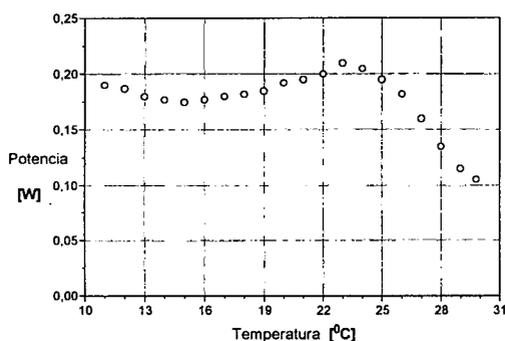


Figura 1. Potencia del Nd:YAG en función de la temperatura del diodo

En el diseño de la cavidad necesaria para el funcionamiento del láser pulsado por mode-locking se tuvo en cuenta la frecuencia de modulación del modulador electroóptico de fase (100 MHz), el astigmatismo del haz de bombeo que se propaga al perfil de ganancia sobre la barra de Nd:YAG y el hecho de que el sistema debía trabajar cerca de un límite de estabilidad geométrica, para amplificar los cambios de tamaño de modo producidos por el autoenfoco por efecto Kerr. Por estas razones se adoptó el esquema de una cavidad doblada en forma de "Z", de acuerdo también con el diseño de Walker et al⁽¹⁾. Esta permite manejar el astigmatismo introducido por el bombeo, y resulta un diseño flexible que permite el control del sistema en la condición de límite de estabilidad geométrica. Luego de un análisis de la cavidad mediante el formalismo de matrices de rayos, e imponiendo que el largo total de la cavidad fuera $L=c.f/2 \approx 1.5$ m, donde c es la velocidad de la luz y f la frecuencia del modulador, se llegó a una

configuración como la que se muestra esquemáticamente en la figura 2.

Los espejos curvos son de 50 cm y 75 cm de radio de curvatura. Los largos de los tres brazos de la cavidad son: $a \approx 49$ cm, $b \approx 79$ cm y $c \approx 22$ cm, y los ángulos θ_1 y θ_2 se fijaron ambos en 3.5° , para corregir el astigmatismo del bombeo.

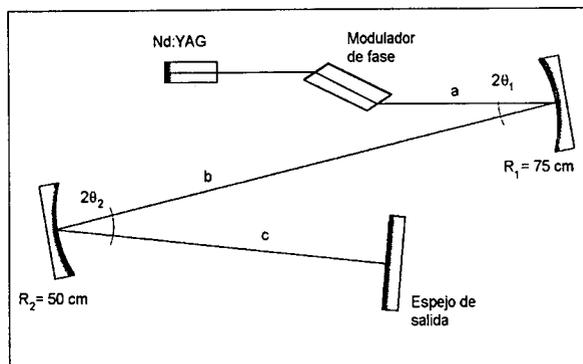


Figura 2. Esquema de la cavidad del Nd:YAG mode-lockeado.

Dentro de esta cavidad se ubica el modulador de fase, que es un cristal de niobato de litio (LiNbO_3) de 15 mm de largo cortado en ángulo de Brewster. Para alinearla entonces se debió recurrir a la formación de una sub-cavidad corta, con un espejo plano de salida y la barra de Nd:YAG como espejo de fondo. La salida de este láser sirvió como haz de alineación de la cavidad larga. Una vez alineada ésta, se levantó la curva de eficiencia de este láser funcionando todavía en modo continuo y se obtuvo una pendiente de eficiencia del 3.8% y un umbral de laseo de 350 mW. Una vez ajustada la polarización de la emisión de la barra de Nd:YAG con la polarización definida por las ventanas en ángulo de Brewster del modulador de fase, el umbral se redujo a 165 mW.

Para ajustar el largo de la cavidad a la frecuencia del modulador, se utilizó un osciloscopio digital HP 54510A de 250 MHz de ancho de banda. Se tomó una muestra del ruido de la cavidad, que tiene componentes de frecuencias correspondientes a múltiplos de $c/2L$; de esta señal se obtuvo su transformada de Fourier, y se comparó con la señal del modulador de fase, sometida al mismo proceso. A partir de la diferencia de frecuencias se corrigió el largo de la cavidad moviendo el espejo de salida y se volvió a tomar una muestra de la señal de la cavidad. Esto permitió ajustar la frecuencia característica de la cavidad a (100.0 ± 0.1) MHz. Con un ligero ajuste posterior de la cavidad, y registrando la salida del láser con un fotodiodo rápido se optimizó la salida pulsada a 100 MHz. La potencia de salida de este láser M-L es de 60 mW para una potencia de bombeo de 1.6 W. Como el espejo de salida es de 2% de transmisión se estima en 3 W la potencia dentro de la cavidad. Con un espejo de salida de 10% de transmisión se obtuvo una potencia de 132 mW para 1.6 W de bombeo, lo que permite estimar la energía de cada pulso en 1.3 nJ.

(efecto de discriminación de modos por efecto Kerr) y *hole burning* espacial (formación de una red de Lippman en el medio activo), que genera modos laterales al principal y contribuyen al acortamiento del pulso. En este sentido es crucial que la barra esté en uno de los extremos de la cavidad.

un segundo diodo de bombeo y la optimización del enfoque del bombeo sobre la barra de Nd:YAG son condiciones necesarias para obtener un funcionamiento de mode-locking pasivo por lente de Kerr (auto-mode-locking).

Este trabajo fue realizado dentro del programa de actividades del contrato CEE CII*-CT93-0331, "Spatio temporal dynamics in lasers".

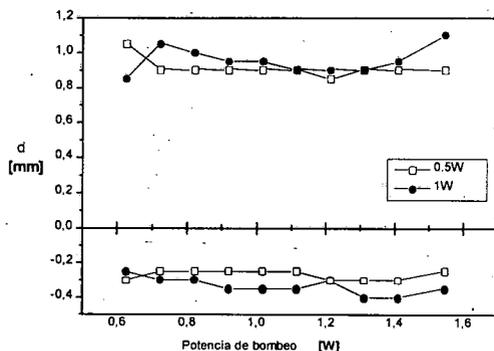


Figura 5. Límites de la zona de estabilidad del M-L para intensidades de RF media y máxima sobre el cristal del modulador. El rango de estabilidad es de aproximadamente 1.3 mm

III. CONCLUSIONES

Se construyó -por primera vez en el país- un láser de estado sólido bombeado por un diodo láser, conformando un sistema "completamente sólido". Se diseñó y armó una cavidad que permitió obtener un régimen de funcionamiento pulsado a 100 MHz con pulsos de 9.1 ps de duración. Se construyó también un autocorrelador que con el que se pudo medir la duración de estos pulsos.

Se analizó la estabilidad del mode-locking obtenido frente a desajustes del largo de la cavidad y se comprobó que su estabilidad es superior a la de un láser con mode-locking estrictamente activo. Se cree que la inclusión de

REFERENCIAS

- 1 - K.X. Liu, C.J. Flood, D.R. Walker, H.M. van Driel, Opt. Lett. **17**, 1361 (1992).
- 2 - G.P. Malcolm, A.I. Ferguson, Opt. Lett. **16**, 1967 (1991).
- 3 - M. Marconi, "Obtención de pulsos de alta potencia láser por medio de un nuevo método en la conmutación de la cavidad de oscilación", Tesis de Doctorado, FCEyN, UBA (1985).
- 4 - M. Marconi, O.E. Martínez, F.P. Diodati, Opt. Com. **63**, 211 (1987).
- 5 - M.A. Larotonda, "Láser de Nd:YAG bombeado por diodos láser continuos. Generación de pulsos cortos por acople de modos", Tesis de Licenciatura, FCEyN, UBA (1996).
- 6 - A.E. Siegman, "Lasers", capítulo 28, University Science Books, California (1986).
- 7 - J.L.A. Chilla, J.L. Vega, "Diseño y construcción de un autocorrelador para la medición de pulsos láser de picosegundos", Informe final de Laboratorio II, Departamento de Física, FCEyN, UBA (1991).