

## LASER DE Nd:YLF BOMBEADO SIMULTANEAMENTE LONGITUDINAL E TRANSVERSALMENTE EM CONFIGURAÇÃO COM ÂNGULO RASANTE INTERNO

Niklaus U. Wetter, Valder O. Correa, Fabíola A. Camargo, Marco A. Ferrari,  
Izilda M. Ranieri, Sonia L. Baldocchi, Nilson D. Vieira Jr.

Centro de Lasers e Aplicações – IPEN/CNEN – SP  
Caixa postal 11049 – CEP 005508 – 900 – São Paulo – SP  
e-mail: nuwetter@ipen.br

### RESUMO

*Lasers de Nd:YLF são amplamente utilizados em aplicações industriais, médicas e como fontes de bombeamento em geral devido à sua capacidade de gerar alta energia por pulso. Comparado ao cristal de Nd:YAG o Nd:YLF apresenta um grau de robustez térmica cinco vezes menor, o que torna necessário o desenvolvimento de arranjos de bombeamento especiais para se obter eficiência durante o bombeamento por diodo, sem causar fratura do cristal. Neste trabalho demonstramos pela primeira vez o laser de Nd:YLF com bombeamento conjunto, lateral e longitudinal. Também demonstramos pela primeira vez bombeamento lateral na configuração com o feixe intracavidade realizando uma única dobra por reflexão interna total na superfície de bombeamento.*

**Descritores:** lasers de estado-sólido, lasers de neodímio, lasers de diodo.

### ABSTRACT

*The Nd:YLF laser is an attractive source whenever high peak pulse power in the near infrared is necessary. Applications include medical, industrial, LIDAR and pumping of other solid-state lasers. When compared to Nd:YAG, the Nd:YLF presents several other advantages such as small thermal lensing, and natural birefringence. On the other hand, its much smaller shock parameter limits the maximum output power that can be achieved for every cm of gain media length. Therefore, special laser set-ups are necessary. We present for the first time a Nd:YLF laser cavity which is simultaneously pumped in the longitudinal and transversal direction. We also show for the first time a grazing-incidence transversal pump set-up of this gain media.*

**Key words:** diode-pumping, Nd:YLF lasers, side-pumping.

### INTRODUÇÃO

O laser de Nd:YLF está sendo amplamente utilizado em aplicações onde é necessária alta potência por pulso no modo de chaveamento de qualidade (chaveamento Q). Aplicações típicas incluem bombeamento de outros lasers, geração de segundo harmônico, LIDAR, aplicações industriais como gravação e micro-corte e algumas aplicações médicas. Em comparação com o laser de Nd:YAG, que é o laser de estado sólido mais empregado comercialmente, o laser de Nd:YLF tem como principal desvantagem uma robustez térmica cinco vezes menor ("thermal shock parameter" de 1,7 W/cm [1,2]).

Na busca por lasers compactos e de alto desempenho tem-se tornado cada vez mais comum a utilização do diodo laser como fonte de bombeamento. Em comparação com a lâmpada "flash" este tipo de fonte apresenta algumas vantagens em termos de eficiência e tamanho: o espectro do diodo é muito mais estreito, comparado com o da lâmpada, e, portanto, apresenta uma melhor sobreposição com o espectro igualmente estreito do dopante do meio ativo. Esta característica é responsável pelo aumento da eficiência (óptica para óptica) de 3% para a lâmpada para aproximadamente 45% (diodo). O diodo laser também

é uma fonte de bombeio que apresenta uma eficiência de 50% na conversão da potência elétrica em potência luminosa [3]. Como quase toda potência não convertida em radiação laser gera calor, os lasers ineficientes precisam de grandes fontes de refrigeração enquanto lasers bombeados por diodo são compactos e com baixo consumo de energia.

Lasers de diodo de alta potência (diodo do tipo barra) emitem a radiação laser em feixes não gaussianos e extremamente assimétricos, que precisam de uma óptica complexa para serem re-configurados em feixes circulares e com parâmetros de qualidade (parâmetros de  $M^2$ ) iguais nas direções horizontal e vertical. Assim, em comparação com a lâmpada "flash", que é uma fonte pontual, o feixe do diodo pode ser colimado eficientemente. Esta característica permite que o feixe de bombeamento seja colinear ao feixe laser intracavidade, o que é chamado de bombeamento longitudinal. Este tipo de bombeamento é amplamente utilizado e permitiu a mais alta eficiência laser jamais reportada (76% de conversão elétrica para óptica [4]). Utilizando Nd:YLF e uma única fonte de diodo, o bombeamento longitudinal gera no máximo em torno de 7 watts [2] antes de fraturar o cristal por tensão termicamente induzida. O bombeamento transversal, por sua vez, utiliza uma óptica menos complexa e possibilita a obtenção de altas potências por permitir que os diodos sejam colocados enfileirados ao lado do meio ativo.

O limite de potência obtido por diodo com cada tipo de bombeamento depende também das características térmicas do cristal. A robustez térmica é basicamente uma função da condutividade térmica e da tensão de cisalhamento do cristal. Ambas as grandezas são significativamente mais baixas no YLF quando comparado com cristais óxidos em geral. Para evitar fratura termicamente induzida e ao mesmo tempo obter altas eficiências, diferentes estratégias estão sendo empregadas. Como o calor gerado localmente dentro do meio ativo é proporcional à absorção do feixe de bombeamento, pode-se simplesmente diminuir a absorção, dissipando assim o calor gerado ao longo do cristal ao custo de uma reduzida eficiência de sobreposição do feixe de bombeamento com o feixe laser [5]. Esta estratégia

tem possibilitado potências de saída acima de 25 watts no modo TEM<sub>00</sub> no Nd:YLF quando bombeado com dois diodos de 30 watts cada (eficiência de 42%). No Nd:YVO<sub>4</sub>, que apresenta alta robustez térmica, foi obtida uma eficiência óptica para óptica de 64% utilizando bombeamento transversal e um feixe intracavidade fazendo uma dobra por reflexão interna total na superfície de bombeamento do cristal [6]. Este cristal apresenta um coeficiente de absorção de 30 cm<sup>-1</sup> e, portanto, absorve praticamente toda potência em uma faixa de apenas 300 micrometros a partir da borda de bombeamento do cristal. É justamente nesta borda que o feixe realiza a dobra e, portanto, consegue aproveitar toda a população invertida gerando uma alta eficiência. Embora esta configuração pareça não ser apropriada para o Nd:YLF, devido ao menor coeficiente de absorção e baixa robustez térmica, existe a possibilidade de que esta tecnologia seja capaz de aumentar significativamente a potência de saída do laser mantendo a alta eficiência do bombeamento lateral. A hipótese é que podemos aumentar a potência de bombeamento porque o feixe intra-cavidade apresenta um efeito de refrigeração sobre o cristal que diminuirá em 50% o calor gerado devido ao efeito de decaimento estimulado [2].

Neste trabalho pretendemos comparar a eficiência laser no bombeamento longitudinal com a eficiência no bombeamento lateral com o feixe intra-cavidade realizando uma dobra dentro do cristal. Para simular a alta taxa de absorção o cristal será bombeado na polarização p (paralelo ao eixo c) e, para diminuir a lente térmica gerada pelo bombeamento, a emissão será gerada na polarização s (perpendicular ao eixo c), cuja lente térmica apresenta uma potência dióptrica sete vezes menor em comparação à polarização  $\pi$ .

## MATÉRIAS E MÉTODOS

O cristal de Nd:YLF foi crescido no Laboratório de Crescimento de Cristais do Centro de Lasers e Aplicações do IPEN pelo método de Czochralski. O cristal foi orientado e depois uma amostra quadrada de 14 x 14 mm<sup>2</sup> e 2 mm de espessura foi cortada, lapidada e polida com o eixo c perpendicular à superfície maior.

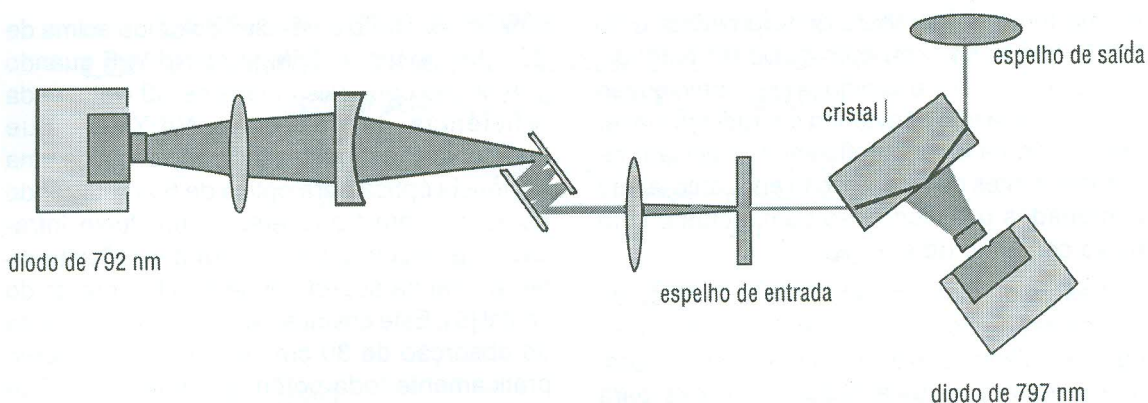


Figura 1 – Arranjo do laser contendo o bombeamento longitudinal com configurador de feixe à esquerda e o bombeamento transversal à direita.

Os espectros de absorção do cristal e de emissão dos diodos (nominalmente emissão em 792 nm e 797 nm em 25°C com 20 watts cada) foram medidos. Uma vez que a emissão dos diodos é uma função da temperatura, a integral de sobreposição espectral entre os diodos e o cristal foi calculada em função da temperatura dos diodos. A cavidade foi montada utilizando o diodo com emissão TE (polarização paralela à barra de diodo) em 792 nm para o bombeamento longitudinal e o diodo com emissão TM em 797 nm para o bombeamento transversal. O bombeamento longitudinal requer uma óptica complexa (configurador de feixe [1]) enquanto nenhuma óptica adicional foi utilizada entre o diodo TM e o cristal.

Foi montada uma cavidade hemisférica com espelho de saída plano com 7,5% de transmissão e espelho de fundo curvo com 30 cm de raio de curvatura. Inicialmente foi feito um bombeamento longitudinal sem dobra dentro do cristal para se ter uma referência da redução de eficiência com a dobra dentro do cristal. Em seguida foi feito o bombeamento longitudinal e transversal conforme Figura 1.

Os dois tipos de bombeamento foram testados separadamente e em conjunto, sempre com os diodos operando com ciclo útil de 10%. Em cada ensaio foi medida a potência de saída em função da potência de bombeamento e da temperatura dos diodos com um detector de alta potência. A qualidade do feixe de saída foi medida com uma câmera CCD acoplada a um computador dotado de um programa de computação para análise de feixe laser.

## RESULTADOS

A Figura 2 mostra os espectros de absorção óptica da amostra e de emissão do diodo 797 nm a uma temperatura de 25°C.

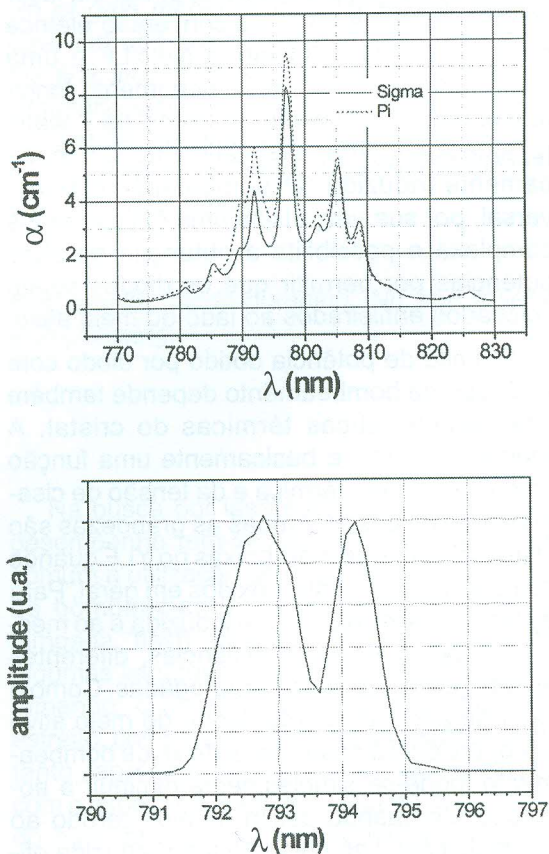


Figura 2 – Espectro de absorção do cristal (acima) e de emissão do diodo 797 nm (abaixo).

Na Figura 2 pode-se observar que este diodo apresenta duas características marcantes: Ele emite em dois picos (uma característica preservada mesmo em outras temperaturas) e a emissão é centrada em 793,5 nm e não em 797 nm, estando portanto fora da especificação.

Por meio do espectro do cristal e da espessura do diodo pode-se calcular que a dopagem de neodímio dentro do cristal é de  $1,38 \pm 0,2$  mol%.

A partir destes espectros pode-se calcular a sobreposição espectral e o coeficiente de absorção efetivo (Figura 3). O coeficiente de absorção máximo ( $7,2 \text{ cm}^{-1}$ ) na Figura 3 é menor do que o pico no espectro do cristal ( $9,5 \text{ cm}^{-1}$ , Figura 2) em 797 nm devido ao fato que a largura do espectro do diodo têm aproximadamente 3 nm e portanto é mais largo do que o pico do cristal em 797 nm. Como as emissões do diodo próximos ao pico de absorção (797 nm) são absorvidas primeiramente, sobra, após alguns milímetros de propagação dentro do cristal, mais potência em emissões ao lado do pico de absorção. Este efeito faz com que o coeficiente de absorção efetivo diminua, conforme mostrado na Figura 3.

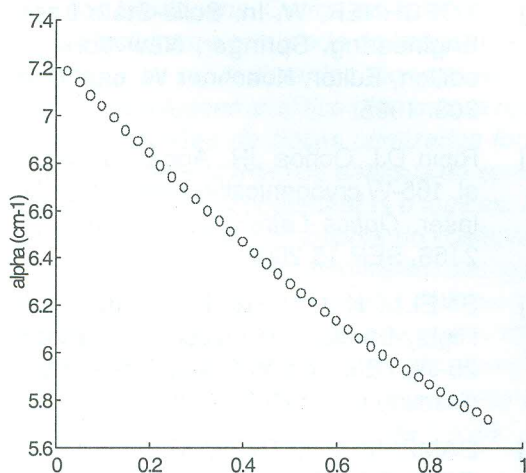


Figura 3 – Coeficiente de absorção efetivo obtido pela emissão do diodo em  $41^\circ\text{C}$ , centralizado em 797 nm, em função da distância a partir da face de bombeamento do cristal.

Utilizando o resultado da Figura 3 pode-se calcular qual a espessura de cristal necessária para absorver 95% da potência de bombeamento (ou seja três comprimentos de absorção,  $3/a$ ). O resultado é de 6,5 mm e de 4,5 mm para bombeamento centrado em 792 nm e 797 nm, respectivamente.

No ensaio de bombeamento longitudinal sem dobra intra-cavidade foi obtida uma potência de saída de 1,7 watts para 9,5 watts de potência incidente no cristal. Os resultados dos ensaios com dobra intra-cavidade são apresentados na Figura 4. A potência de saída obtida apenas com bombeamento longitudinal (círculos) é de 0,25 watts com o diodo operando a  $25^\circ\text{C}$ . Este diodo emite nominalmente em 792 nm porém efetivamente medimos uma emissão centrada em 798 nm. Ao aquecer o diodo para  $38^\circ\text{C}$  (emissão em 792 nm) a potência de saída aumentou para 0,4 watts. Na comparação com o laser funcionando sem dobra intra-cavidade (1,7 watts) houve uma grande perda de potência, provavelmente devido à má qualidade da superfície de dobra.

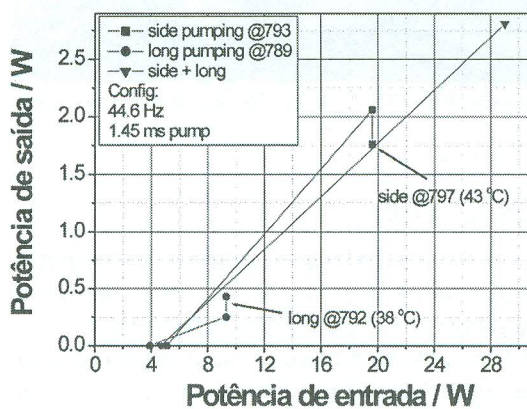


Figura 4 – Potência de saída do Nd:YLF para o feixe laser com dobra dentro do cristal: bombeamento transversal (side) e longitudinal (long).

O bombeamento transversal, com diodo em  $25^\circ\text{C}$  (793 nm) gerou uma potência de saída de 2,1 watts para 20 watts incidente no cristal. Aumentando a temperatura do diodo para  $43^\circ\text{C}$  (emissão em 797 nm) a potência cai apesar da melhor absorção deste comprimento de onda, porque diodos diminuem a sua potência de saída com o aumento de temperatura. Operando os dois diodos em conjunto foi obtida uma potência de saída de 2,8 watts.

O feixe de saída gerado pelo bombeamento lateral (ou lateral e longitudinal em conjunto) é um feixe tipicamente multimodo e apresenta um fator de qualidade  $M^2$  de  $20 \times 2$  horizontal e vertical, respectivamente. Este  $M^2$  corresponde a um modo  $\text{TEM}_{60}$ .

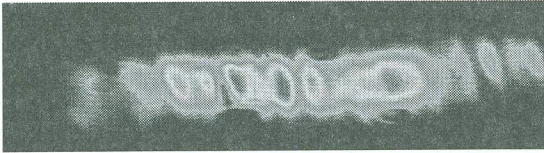


Figura 5 – Feixe multimodo no campo próximo gerado pelo bombeamento transversal.

Utilizando uma fenda intra-cavidade forçamos a oscilação do modo  $TEM_{00}$  conforme Figura 6. Este feixe apresentou uma potência de 0,8 watts e um fator  $M^2$  de  $1,5 \times 1,2$  horizontal e vertical, respectivamente.

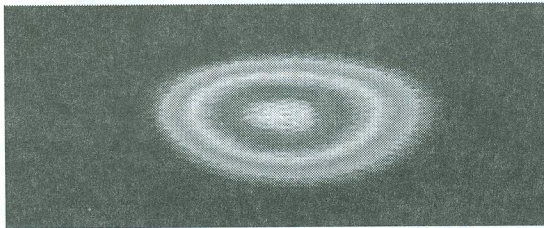


Figura 6 – Feixe  $TEM_{00}$  obtido com fenda intra-cavidade.

## CONCLUSÕES

Em termos de cristal podemos concluir que ele apresenta uma alta dopagem de neodímio o que favorece o bombeamento lateral. Porém, a má qualidade da superfície impediu resultados melhores e fez com que houvesse uma queda na potência de saída de 1,7 watt (sem dobra) para 0,4 watt (com dobra) durante o bombeamento longitudinal.

O diodo, com emissão nominal em 797 nm, apresentou um desvio bastante acentuado (emissão efetiva em 793 nm) e um espectro composto por dois picos, o que impediu uma absorção eficiente, que poderia ser obtida com uma única emissão em 797 nm. O comprimento de  $3/\alpha$  passou de 3 mm para 6,5 mm. Como resultado, a absorção ficou mais diluída dentro do cristal o que fez com que, durante o bombeamento lateral, o modo  $TEM_{00}$ , que tem um diâmetro de apenas 800 micrometros dentro do cristal, experimentasse um ganho menor, gerando apenas 0,8 watt.

As potências obtidas com o bombeamento transversal foram muito maiores do que as obtidas no bombeamento longitudinal, usando a mesma potência de diodo, demonstrando a utilidade deste arranjo. O fato da absorção

efetiva diminuir, conforme Figura 3, demonstra que a dobra na superfície é necessária para aproveitar eficientemente o ganho.

Neste trabalho foi demonstrado, pela primeira vez, o laser de Nd:YLF com bombeamento conjunto, lateral e longitudinal. Também foi demonstrado, pela primeira vez, bombeamento lateral na configuração com dobra intra-cavidade em Nd:YLF.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à FAPESP pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- [1] KOECHNER, W. In: Solid-State Laser Engineering. Springer, New York, 4<sup>th</sup> edition, Editor: Koechner W., cap. 7, p.398. 1996.
- [2] POLLNAU, M.; HARDMAN, P. J.; KERN, M. A.; CLARKSON, W. A.; HANNA, D. C. Upconversion-induced heat generation and thermal lensing in Nd:YLF and ND:YAG. *Phys. Rev. B* 58 (24), p.16076-16092. 1998.
- [3] KOECHNER, W. In: Solid-State Laser Engineering. Springer, New York, 4<sup>th</sup> edition, Editor: Koechner W. cap. 6, p. 308. 1996.
- [4] Ripin DJ, Ochoa JR, Aggarwal RL, et al. 165-W cryogenically cooled Yb : YAG laser. *Optics Letters* 29 (18), p.2154-2156. SEP 15 2004.
- [5] SNELL, K.J.; LEE, D.; WALL, K.F. Highly-Efficient, Transversely-Pumped, 25-W,  $TEM_{00}$  Nd:YLF Slab Laser. Post-deadline paper CLEO 2000
- [6] DAMZEM, M.J.; TREW, M.; ROSAS, E.; CROFTS, G. J. Continuous-wave nd:YVO4 grazing-incidence laser with 22,5 W output power and 64% conversion efficiency, *Opt. Comm.* 196, p.237-241. 2001.
- [7] Wetter, N.U.; Three-fold effective brightness increase of laser diode bar emission by assessment and correction of diode array curvature. *Optics And Laser Technology*, v. 33, n. 3, p.181-187, 2001.