

## BLUE DIODE PUMPED SOLID STATE LASER FOR SHORT PULSE, LARGE BANDWIDTH TI:SAPPHIRE PUMPING

Gustavo Bernardes Nogueira, Fabíola de Almeida Camargo, Jonas Jakutis Neto,  
Renato Juliani Ribamar Vieira, Niklaus Ursus Wetter  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN São Paulo  
Centro de Lasers e Aplicações IPEN/CNEN - SP  
CEP 05508-000 - São Paulo - SP  
e-mail: jnogueiragu@gmail.com

### RESUMO

Lasers emitindo no azul vêm sendo largamente utilizado em diversas aplicações como por exemplo "Blue Ray", "LCD", e podem representar uma excelente fonte de bombeio para o meio ativo Ti:safira. Neste trabalho utilizamos um cristal de Nd:YAG, com "diffusion bonded end-caps" e um bombeamento com diodo semiconductor no comprimento de onda de 803nm, dessintonizado do pico de absorção 808nm de neodímio, a fim de minimizar os efeitos de lente térmica do Nd:YAG. Dessa forma, conseguiu-se uma melhor distribuição de temperatura dentro do cristal. Testando diferentes raios de curvatura para os espelhos da cavidade, obteve-se a melhor relação entre a cintura do feixe de bombeio e feixe laser, alcançando 6,75W cw de potência de saída laser em 946 nm e "slope efficiency" de 48%. Em um segundo passo foi inserido, em diferentes tipos de cavidades, um cristal dobrador de frequência para obtenção de emissão no azul em 473nm, e a potência de saída azul foi medida em função da potência absorvida.

**Descritores:** laser de estado-sólido, laser Nd:YAG, diferentes ressonadores laser.

### ABSTRACT

Blue lasers have attracted much attention for applications such as Blue Ray, LCD and as pumped source for the Ti:sapphire laser. A Nd:YAG crystal with diffusion bonded end-caps was used together with a pump wavelength of 803nm, detuned from the absorption peak at 808nm in order to minimize the thermal lens effect by providing for a better temperature distribution inside the crystal. Using different input mirror radii, the best

relation between pump waist and laser was achieved in a linear cavity and resulted in 6.75W cw laser power at 946 nm and slope efficiency of 48%. In a second step, a second harmonic generation crystal for blue emission at 473 nm was inserted into different types of resonators, and the blue output power at 473nm was measured as a function of absorbed pump power.

**Key words:** solid state laser, Nd:YAG laser, different resonator.

### INTRODUÇÃO

O pico de absorção do cristal de Ti:safira está centrado em 488 nm, que se encontra próximo do segundo harmônico da transição de três níveis  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  do Nd:YAG. Nesse sistema há reabsorção do comprimento de onda da emissão laser devido à existência de uma população não desprezível no nível inferior laser, 0,77% à temperatura ambiente. Entretanto, esta população é muito menor do que nos cristais de Nd:YLF (3,4%) e GdVO<sub>4</sub> (5,6%). Por isso o sistema do Nd:YAG, operando na transição mencionada, pode ser considerado como um sistema de quase-quatro níveis. O nível Stark utilizado para a geração do 946 nm é o último nível degenerado do estado fundamental, cuja energia é 852 cm<sup>-1</sup>. Uma das dificuldades em se utilizar o Nd:YAG deve-se à sua forte lente térmica e emissão não polarizada, que por consequência, decresce a eficiência da geração de segundo harmônico (GSH). [1]

Outros meios ativos têm sido explorados para a geração de azul, tais como: Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:YAG e Nd:YLF. A maior potência em azul reportada (14.8W) foi obtida com o cristal de Nd:GdVO [2] devido à elevada

secção de choque de emissão em 912 nm ( $(6,6 \times 10^{-20} \text{cm}^2(\pi)$  e  $5,6 \times 10^{-20} \text{cm}^2(\sigma)$ ), e à sua emissão naturalmente polarizada, o que aumenta a eficiência da GSH.

No caso do Nd:YAG, embora a secção de choque em 946nm seja relativamente mais baixa ( $3,7 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ ) que o cristal anterior, ainda assim consegue-se obter potências elevadas nesse comprimento de onda por causa da grande separação do nível Stark. No caso do Nd:YLF, embora tenha a emissão naturalmente polarizada em 908 nm, a baixa secção de choque nesse comprimento de onda ( $1,2 \times 10^{-20} \text{cm}^2(\pi)$  e  $1,3 \times 10^{-20} \text{cm}^2(\sigma)$ ) e a alta população do último nível Stark à temperatura ambiente, inviabiliza a obtenção de potências elevadas.

Desde a primeira operação em 946 nm feita por Fan e Byer [3] muito tem sido feito para melhorar a potência de saída e a eficiência desse laser. Até o presente momento a maior potência laser de saída em 946 nm foi de 15,2 W cw em uma cavidade linear, para uma potência incidente de 40,2 W, obtendo uma *slope efficiency* de 45% [4]. Essa cavidade tem 13 mm e foi utilizado um cristal Nd:YAG de  $\Phi 3 \times 12 \text{ mm}^3$  com 1,1% de Nd e um espelho de saída com raio de 110 mm, com transmissão de 5%. O *coating* na face de entrada deste cristal comporta-se como um espelho plano para o feixe laser, e dessa forma obtém-se um cintura de feixe no cristal, o que diminui a influência de lente térmica.

Utilizando o cristal de Nd:YAG em um ressonador em forma de L, foi reportada uma potência laser de saída de 2,41 W cw em 473 nm para uma potência incidente de 16 W [5]. Nessa cavidade foi utilizado o BiBO como cristal dobrador de frequência, e obteve-se uma eficiência de conversão óptica-óptica de 15,1%.

Neste ano, utilizando o Nd:YAG em um ressonador em forma de Z, foi reportado a máxima potência de 4,3 W cw em 473 nm, para uma potência absorvida de 18,7 W. Nessa cavidade foi utilizado o cristal LBO de 15 mm de comprimento [6]. Nesse artigo o cristal Nd:YAG foi bombeado em 808 nm e 885 nm, e o melhor resultado em azul foi obtido com o bombeio em 885 nm, pois houve uma distribuição mais homogênea da potência de bombeio através cristal, devido a mais baixa absorção desse comprimento de onda, se

comparado com 808 nm. Adicionalmente o menor *Stokes shift* diminui o calor depositado por ciclo de bombeamento. O fator de qualidade do feixe  $M^2$  foi de 1,2 para o laser azul, obtido pela técnica *knife-edge* [6].

E em um ressonador em forma de anel, já foi reportada uma potência de 1,0 W cw em frequência única no azul em 473 nm, para uma potência incidente de 23 W, utilizando um cristal Nd:YAG/ppKTP, com estabilidade melhor que  $\pm 1,8\%$  em 4 horas [7].

## MATERIAIS E MÉTODOS

Visando minimizar os efeitos da forte lente térmica, no nosso arranjo foi utilizado um cristal de Nd:YAG com *diffusion bonded end-caps* sem *coating* com alta refletividade (HR), bombeando-o em 803 nm. Este comprimento de absorção é descentralizado do pico de absorção (808nm), promovendo assim, uma melhor distribuição de calor dentro do cristal.

Primeiramente, a emissão no comprimento de onda fundamental, 946 nm, foi estudada utilizando-se uma cavidade de 1,7 cm de comprimento com diferentes raios de curvatura (RC) para os espelhos de entrada (50 mm, 100 mm e 300 mm) e um espelho plano de saída com 7,3% de transmissão. Diferentes diâmetros de bombeio foram analisados a fim de se obter a melhor relação diâmetro de bombeio e diâmetro do feixe laser.

Depois de estabelecido o espelho que produzia o melhor acoplamento entre cintura do feixe laser e cintura de bombeio (RC = 100mm), verificou-se a estabilidade do ressonador, para a emissão em azul, em função da potência absorvida, em diferentes tipos de cavidades (linear (Figura 1) e L (Figura 2)).

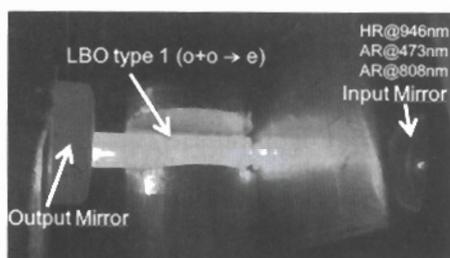


Figura 1: Arranjo da Cavidade Linear.

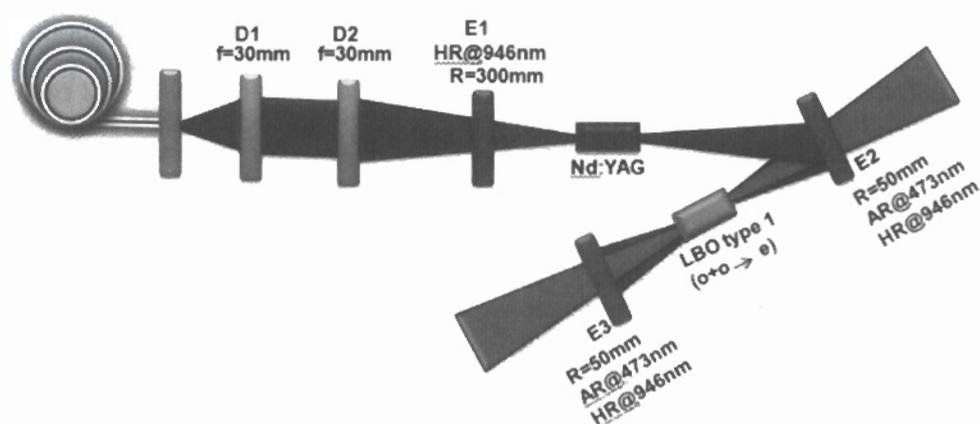


Figura 2: Arranjo da cavidade em L.

Na cavidade linear a emissão azul em 473 nm foi obtida por meio da geração de segundo harmônico intracavidade utilizando dois cristais dobradores de frequência, LBO tipo I (ooe), com dimensões transversais de  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  e diferentes comprimentos (10 mm e 15 mm). O ressonador foi aumentado para 3,5 cm e 4,0 cm, quando utilizado o LBO de 10 mm e 15 mm de comprimento, respectivamente. No lugar do espelho de saída anterior, com transmissão de 7,3%, colocou-se outro espelho plano com *coating* HR em 946nm e anti-refletor (AR) em 473 nm. Porém, devido à instabilidade dessa cavidade linear, para emissão em azul, foi desenvolvida a cavidade em L (Figura 2).

Essa cavidade é mais apropriada para a emissão em azul, em relação à anterior, pois nela é possível produzir dois focos com dimensões diferentes: um para que se tenha um alto ganho no cristal de Nd:YAG, e outro para se obter a máxima eficiência de dobra de frequência no cristal dobrador.

Entretanto a cavidade em L também se apresentou instável, para potências absorvidas maiores que 12W (Figura 6). Por este motivo desenvolveu-se uma cavidade em anel (Figura 3), que também produz dois focos com dimensões diferentes.

Entretanto, na cavidade em anel a mudança da posição do foco no dobrador, não ocorre, diferentemente da cavidade em L. Mesmo com a lente térmica no cristal de Nd:YAG, o deslocamento do foco no dobrador não ocorre, porque a cavidade é simétrica

para circulação da luz para a direita ou para esquerda. O tamanho total dessa cavidade é de 32,1 cm. Ela contém dois espelhos de 50 mm no local do foco no cristal dobrador e dois espelhos planos no cristal de Nd:YAG, conforme Figura 3.

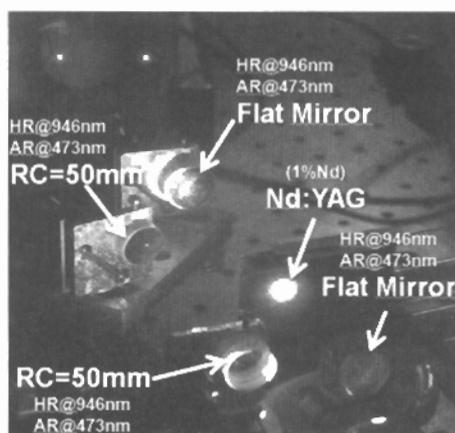
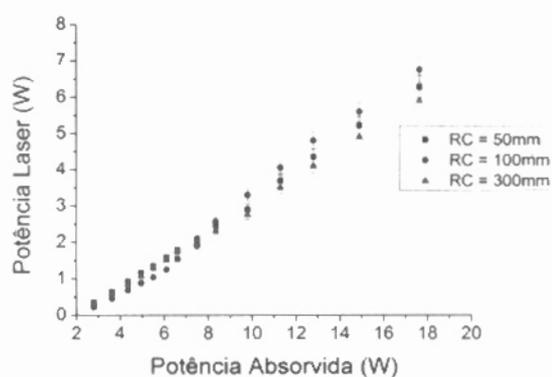


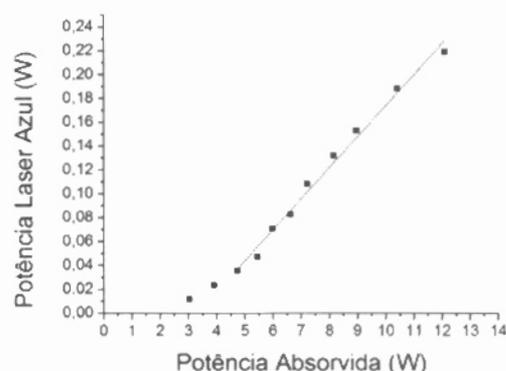
Figura 3: Arranjo da Cavidade em Anel.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a cavidade linear simples de 1,7 cm de comprimento, foi obtida, com o espelho de raio de 100mm (Figura 4), uma potência máxima laser de saída de 6,75 W contínua em 946nm para 17,65 W de potência absorvida, com uma cintura de feixe de bombeio de  $118 \mu\text{mm}$ , resultando em uma *slope efficiency* de 48%.

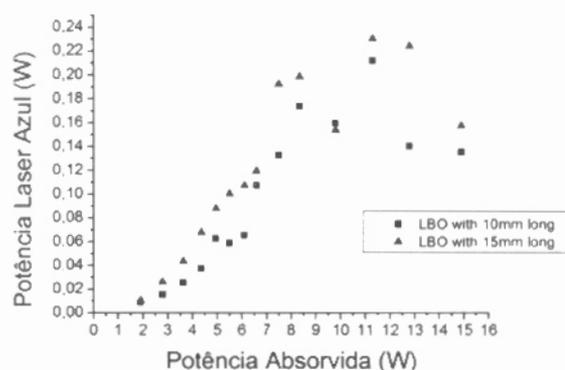


**Figura 4:** Potência de saída com emissão em 946nm na cavidade linear.



**Figura 6:** Potência de saída com emissão em 473nm na cavidade em L.

Com a configuração da cavidade linear, obteve-se uma potência máxima azul de saída de 230 mW em 473 nm, utilizando o LBO de 15 mm de comprimento, e quando utilizado o LBO de 10 mm de comprimento, a potência máxima azul de saída foi de 212 mW em 473 nm, ambos os resultados para a mesma potência absorvida de 11,3 W (Figura 5).



**Figura 5:** Potência de saída com emissão em 473nm na cavidade linear.

A cavidade em L apresentou-se estável em potências absorvidas baixas, entretanto demonstrou-se instável, para potências absorvidas maiores que 12 W. A potência máxima de saída em 473 nm foi de 218 mW (Figura 6).

Nos testes preliminares da cavidade em anel, ela manteve-se estável até, aproximadamente, 30 W de potência absorvida, para emissão em infravermelho.

## CONCLUSÕES

Para a emissão no comprimento de onda de 946 nm, este trabalho demonstrou, pela primeira vez, a melhor *slope efficiency* de 48% sob bombeamento em 803nm.

Para a emissão no comprimento de onda de 473 nm, a cavidade em L deveria apresentar-se estável, mas demonstrou-se instável para potências absorvidas maiores que 12 W, devido à lente térmica no cristal de Nd:YAG e à mudança da posição do foco no dobrador de frequência.

Uma cavidade em anel compacta, com 32,1 cm de comprimento, mostrou-se estável em até, aproximadamente, 30 W de potência absorvida. Esta cavidade, portanto, apresenta as condições necessárias para geração de azul com alta potência de saída.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.

## REFERENCIAS

- [1] Koechner, W. Solid-State Laser Engennering. Springer. New York. 4th edition, Koechner W. p.54-61. 2006.
- [2] Quan Z., Yi Y., Bin L., Kai Z., Yang L., Ling Z.. Experimental study of the generation of a blue laser by intracavity frequency doubling of a cw Nd:GdVO4 laser with lithium borate. Appl Opt, 48(16), Jun 1, 2979-82. (2009).
- [3] Fan T. Y. and Byer R. L., IEEE J. Quantum Electron.23, 605 (1987).
- [4] Zhou R., Li E., Li H., Wang P., and Yao J., Continuous-wave, 15.2 W diode-end-pumped Nd:YAG laser operating at 946 nm, Opt. Lett. 31, 1869-1871 (2006).
- [5] Jia F., Xue Q. Zheng Q., Yi-kun B., Long-sheng Q.. 2.41 W compact efficient CW blue light generation by intra-cavity frequency doubling of a compact Nd:YAG laser. Optics & Laser Technology, Volume 39, Issue 5, July, 1081-1083 (2007).
- [6] Lü Y.F., Yin X.D., Xia J., Wang R.G., Wang D.. Efficient continuous-wave intracavity frequency-doubled Nd:YAG-LBO blue laser at 473 nm under diode pumping directly into the emitting level. Laser Phys. Lett. 7, No. 1, 25–28 (2010).
- [7] Wang Y., Liu J., Liu Q., Li Y., Zhang K. Stable continuous-wave single-frequency Nd:YAG blue laser at 473 nm considering the influence of the energy-transfer upconversion. Optical Society of America (2009).