

Laser de Yb:Tm:YLF emitindo em 2,3 μm bombeado por diodo-laser

Paulo Sérgio Fabris de Matos, Niklaus Ursus Wetter e Izilda Maria Ranieri

Centro de Lasers e Aplicações – IPEN/SP – Av. Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária 05088-900 São Paulo-SP

Resumo — Foi desenvolvido um laser em 2,3 μm de Yb:Tm:YLF bombeado longitudinalmente por um diodo-laser do tipo barra. O cristal é dopado com 10 mol% de itérbio e 1 mol% de Tm. A partir da absorção do bombeamento em 960 nm com 7 W, é obtida uma potência pico de 200 mW em regime quase-contínuo. Esta é a primeira vez que este tipo de laser é bombeado por diodo-laser do tipo barra e uma das mais altas potências já obtidas.

Palavras-chaves — Laser bombeado por diodo, Yb:Tm:YLF, 2,3 μm .

I. INTRODUÇÃO

Lasers de estado-sólido emitindo em 2 μm têm aplicações importantes em diversas áreas. Em medicina, é correntemente utilizado em vários procedimentos cirúrgicos. Este comprimento de onda é bem absorvido pela água e alguns tecidos humanos, possibilitando incisões precisas com pequeno dano térmico aos tecidos adjacentes [1]. O laser de 2 μm é menos absorvido pela água do que o de 3 μm , porém, esta característica pode ser vantajosa para tecidos vasculares, pois uma menor absorção pela água favorece a coagulação e a hemostase. Outra vantagem em relação aos lasers de 3 μm é a possibilidade de entrega do feixe de 2 μm por fibras ópticas convencionais, o que reduz o seu preço.

Outra importante aplicação de lasers de 2 μm encontra-se na área de sensoriamento remoto [2]. Têm sido largamente utilizados para monitoramento atmosférico, em medidas de velocidade de vento [3] e composição do ar [4]. Neste tipo de aplicação, é interessante o uso de um laser seguro à visão [5], ou seja, emitindo acima de 1,5 μm . Além disso, pode ser também necessária uma menor absorção pela água, o que muitas vezes torna o laser de 2 μm mais adequado que o de 3 μm .

Os principais sistemas para obtenção de laser em 2 μm são o hólmio e o túlio. Ao contrário do túlio, o hólmio não possui absorções coincidentes com diodos existentes no mercado [6]. Além disso, tem um alto limiar para ação laser a temperatura ambiente [7]. A codopagem com túlio, este como sensibilizador, torna o laser de hólmio mais eficiente, diminuindo o limiar de ação laser [8]. Porém, para o sistema co-dopado Tm:Ho, os melhores resultados em termos de potência a temperatura ambiente não passam da ordem de 3 W [9], enquanto que para o Tm já se obteve mais de uma centena de watts [10]. Os melhores resultados para laser de Ho:YLF foram obtidos quando bombeados por Tm:YLF [11,12].

O laser de túlio também pode ser obtido com o uso de um sensibilizador, como o itérbio, para obtenção de eficiente ação laser [13], aproveitando a alta absorção do itérbio em 960 nm. Para este comprimento de onda existem diodos-laser de alta potência.

Na região de 2 μm , o Tm pode emitir em 1,9 e 2,3 μm . A absorção do Yb:Tm:YLF em 960 nm ocorre entre os níveis $^2F_{7/2}$ e $^2F_{5/2}$ do itérbio (Fig. 1). É transferida energia de forma não ressonante do nível $^2F_{5/2}$ (Yb) para o 3H_5 (Tm), seguido de relaxação multifotônica para o 2F_4 (Tm), nível laser superior da emissão em 1,9 μm . Existem indicações [17] de que processos ineficientes de diminuição da população do nível laser inferior impossibilitariam a ação laser para o Yb:Tm:YLF em 1,9 μm .

A emissão em 2,3 μm ocorre entre os níveis 3H_4 e 3H_5 . Após a transferência do nível $^2F_{5/2}$ do itérbio para o nível 3H_5 do túlio, ocorre um processo de conversão ascendente entre os níveis 3F_4 e 3F_2 do túlio, com posterior relaxação para o nível de emissão 3H_4 .

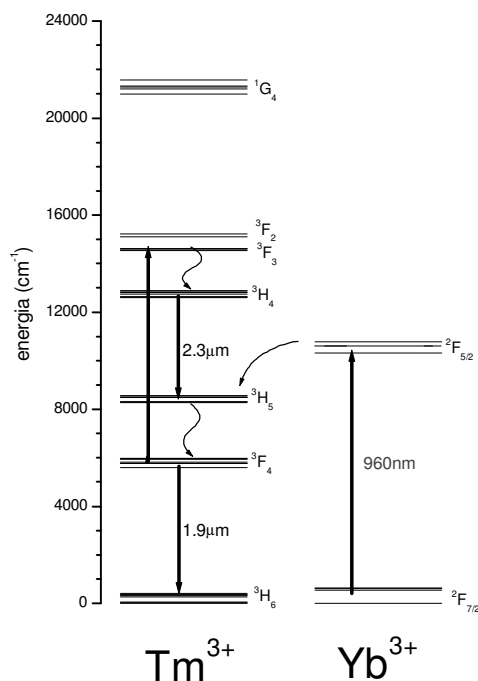


Fig. 1: Diagrama de níveis do Yb:Tm

O nível laser superior no Tm pode ser depopulado por conversão ascendente para o nível 1G_4 ocasionando luminescência azul. Também pode ser depopulado por

relaxação cruzada com o estado fundamental $\{^3H_4 \rightarrow ^3F_4\}$ e $\{^3H_6 \rightarrow ^3F_4\}$. Este último processo depende fortemente da concentração de Tm, sendo significativo a partir de 1 mol% de Tm [14].

O processo de transferência de volta (back-transfer) $\{^3H_4(Tm) \rightarrow ^2F_{5/2}(Yb)\}$ é dependente da concentração de Yb. A concentração ideal para que ainda haja eficiente absorção do bombeamento, porém sem considerável perda por back-transfer, seria de aproximadamente 4 % [15].

O laser de túlio em 2,3 microns apresenta uma larga emissão, sendo já obtida sintonia entre 2,20 e 2,46 microns [16].

Em termos de ação contínua, o melhor resultado obtido com Yb:Tm:YLF em 2,3 microns reportado na literatura é de 450 mW [17].

II. PARTE EXPERIMENTAL

A. Crescimento do cristal

A síntese, purificação e crescimento dos cristais de YLF:Yb:Tm foram realizadas no Laboratório de Crescimento de Cristais do IPEN. Os fluoretos foram obtidos a partir de óxidos de alta pureza (Alpha-Johnson Matthey e Aldrich, 99.99% ou 99.999%) por hidrofluorinação a temperaturas em torno de 850 °C sob um fluxo de HF (Matheson, 99.99%) e argônio (White Martins, 99.999%). Os óxidos na forma de pó foram acondicionados em uma barquinha cilíndrica de platina, com 20 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, introduzidos num reator de platina e aquecidos até 850 °C, onde permaneciam de 2 a 3 horas. O fluoreto ternário foi sintetizado fundindo-se os compostos na mesma atmosfera, com a composição de 50,5 mol% LiF: 49,5 mol% YF₃. O LiF (Alpha-Johnson Matthey, 99.9%) na forma de pó foi purificado pela técnica de refino por zona antes de ser adicionado à mistura.

O LiF foi purificado a partir do reagente comercial com 4 ciclos com velocidade da zona de 4 cm/h e 2 ciclos com velocidade de 2 cm/h. A misturas de LiF-YF₃ foi purificado pela mesma técnica em um único ciclo utilizando-se uma velocidade transversal de 6 mm/h. Durante estes processos utilizou-se um fluxo de HF e argônio. No caso da mistura de LiF-YF₃, devido ao caráter ligeiramente incongruente da fusão, o lingote final é formado por três regiões distintas, uma região inicial opaca onde se tem um excesso de YF₃, uma região central transparente, porém policristalina onde o composto YLF é formado com composição estequiométrica e uma região final onde se concentram o excesso de LiF e as impurezas. A região estequiométrica foi utilizada para o crescimento dos cristais.

Os cristais foram crescidos pelo método de Czochralski em um sistema fechado com aquecimento resistivo. Este sistema é confeccionado em aço inox com paredes duplas, refrigeradas à água e permitem a operação em vácuo. Como procedimento usual os materiais são aquecidos a vácuo até 500 - 600 °C para a eliminação de água e oxigênio e posteriormente o sistema é preenchido com o gás argônio, sob o qual se processa o crescimento. Sementes orientadas de YLF foram utilizadas e o diâmetro foi controlado

manualmente. Para o controle de temperatura foi utilizado um controlador da Eurotherm modelo 818. A velocidade de puxamento foi de 1 mm/h e as velocidades de rotação foram de 20-25 rpm.

B. Arranjo do laser

O diodo usado para o bombeamento longitudinal é do tipo barra, modelo OPC-A020-mmm-CN da Opto Power, com emissão centrada em 964 nm (a 25°C) e potência máxima de 20 W. Uma lente cilíndrica de 0,44 mm de diâmetro é montada diretamente na face do emissor no sentido da barra. O feixe do diodo, que é formado por 20 emissores, tem após a lente, 1 cm na direção paralela à barra e 0.2 mm na direção perpendicular. Após passar por um conjunto óptico de focalização (Fig. 2), o feixe é reconfigurado por um *beam shaper* [18]. No foco onde o cristal é colocado, o feixe de bombeamento tem M² de 10 por 15 e cintura de 110 por 155 microns, nas direções horizontal e vertical respectivamente (Fig. 3). Em razão de perdas provocadas na óptica de focalização, no espelho de entrada e, principalmente com a formatação do feixe do diodo em uma coluna pelo beam-shaper, a potência máxima incidente no cristal é de 7 W.

Foi montada uma cavidade plano-côncava de 3 cm de comprimento. Para o casamento de modos, é usado um espelho de entrada de 10 cm de raio de curvatura, que gera uma cintura de 180 microns na posição do cristal e um espelho de saída plano.

O cristal de Yb:Tm:YLF é cortado em ângulo de Brewster, com 4,6 mm de comprimento e absorve 97% do bombeamento. A dopagem nominal no *melt* é de 10 mol% de itérbio e 1 mol% de Tm. Medimos com um espectrômetro Cary uma dopagem no cristal de 9,4 mol% de Yb e 1,3 mol% de Tm.

A emissão em 2,3 µm é monitorada por um detector de PbS. As potências são medidas com um detector de alta potência do tipo termo-pilha (Newport 818T-150) com precisão de 3%.

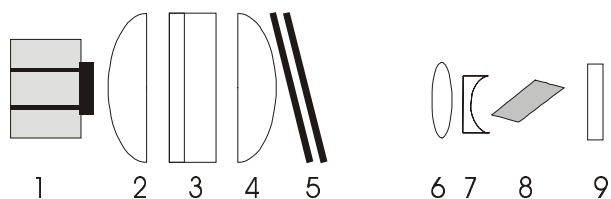


Fig. 2: Arranjo de laser de Yb:Tm:YLF. (1) diodo e micro-lente, (2) $f_x=2.5\text{cm}$, (3) $f_y=2.5\text{cm}$, (4) $f_x=2.5\text{cm}$, (5) beam shaper, (6) $f_{xy}=2.5\text{cm}$, (7) espelho com $R=10\text{cm}$, (8) cristal, (9) espelho plano com $R=98.2\%$.

O diodo tem sua temperatura controlada por um termoeletrico. Sua emissão espectral tem variação de 0,3 nm/°C. Através do espectro de absorção do cristal e do espectro de emissão do diodo (Fig. 4), é feita a *overlap integral* para determinar a temperatura ideal de funcionamento do diodo de forma a ter a máxima absorção pelo cristal (Fig. 5). Esta temperatura é de 9°C, porém, para

evitar problemas de umidade no diodo, este foi mantido a temperatura mínima de 15°C.

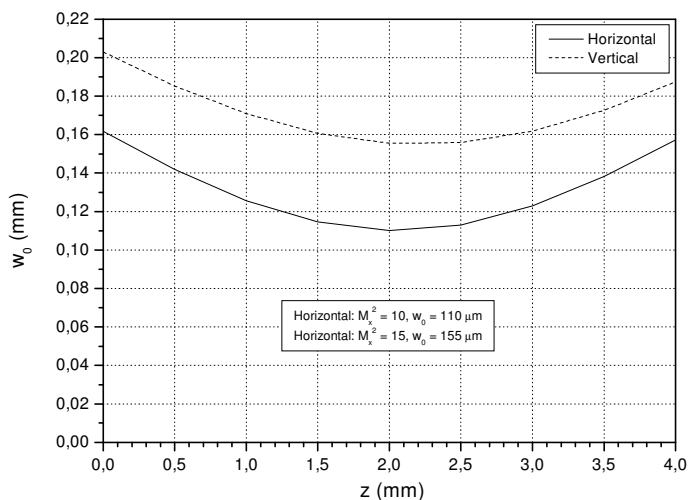


Fig. 3: Perfil do feixe de bombeamento.

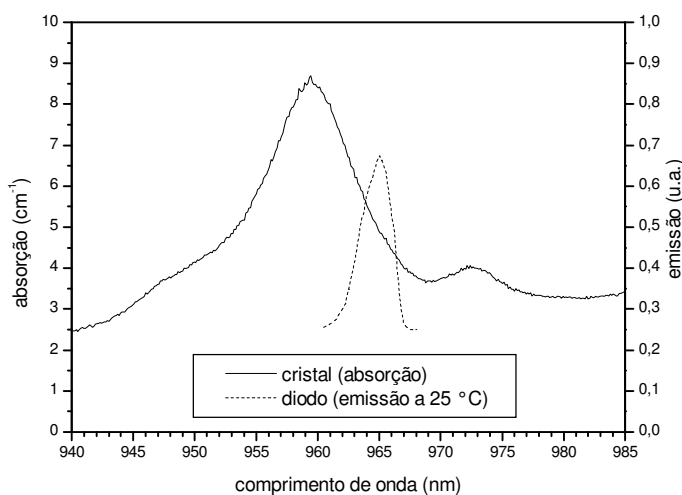


Fig. 4: Espectro de absorção do cristal Yb:Tm:YLF e espectro de emissão do diodo-laser a 25°C.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi utilizado regime quase-contínuo de bombeamento, com pulsos de 4 ms de duração e frequência de 25 Hz. O feixe de bombeamento foi configurado de forma a ter M^2 pequeno nas duas direções e grande intensidade de bombeamento, mesmo com prejuízo da potência total. A intensidade incidente no cristal é de 13 kW/cm².

Utilizando um espelho de saída com 98,8 % de refletividade, a máxima potência obtida de laser em 2,3 microns foi de 200 mW. A eficiência é de 5,2 % (Fig. 6) e a potência limiar, 3,4 W.

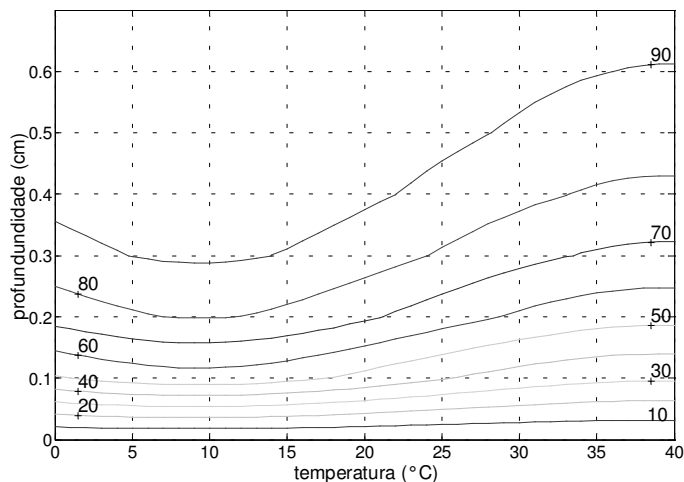


Fig. 5: Porcentagem de bombeamento absorvido por profundidade e temperatura para o diodo e o cristal utilizado.

Trocando o espelho de saída para um com 98,2 % de refletividade, a potência pico diminuiu em 30 %.

Não existe reportado na literatura a obtenção de laser com o Yb:Tm:YLF bombeado por uma barra de diodos. Com este tipo de diodo, existe grande dificuldade de se obter um feixe com a intensidade necessária.

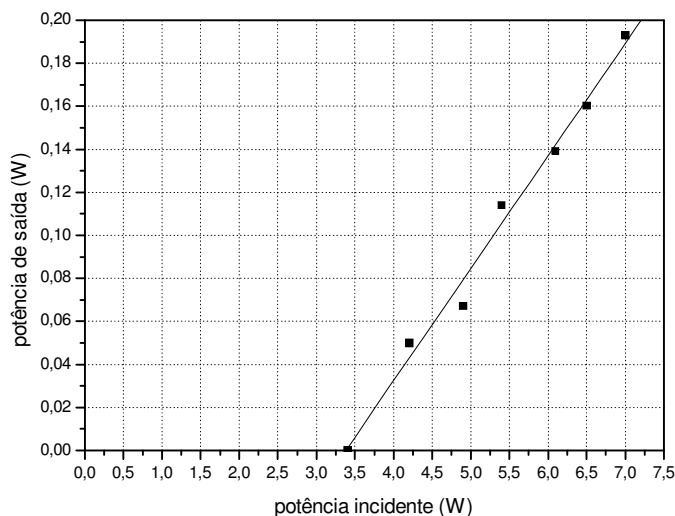


Fig. 6: Curva de eficiência para o cristal de Yb:Tm:YLF.

Mantendo a largura do pulso de bombeamento em 4 ms, foram verificadas a variação de potência e a alteração do pulso de 2,3 microns em função da frequência de bombeamento. O aumento da frequência provoca redução da potência pico (Fig. 7) e diminuição do atraso do pulso do laser em relação ao pulso de bombeamento (Fig. 8), porém não alterou a potência média. Portanto, a eficiência foi mantida. A diminuição na potência pico com o aumento da

taxa de repetição pode ser uma indicação de um gargalo no ciclo de bombeamento do túlio, como por exemplo um estado de longa vida no processo de conversão ascendente para o nível 1G_4 .

IV. CONCLUSÕES

Foi bombeado um cristal de Yb:Tm:YLF em 960 nm com diodo-laser do tipo barra e obtida emissão em 2,3 microns com 200 mW de potência e uma eficiência de 5,2 %.

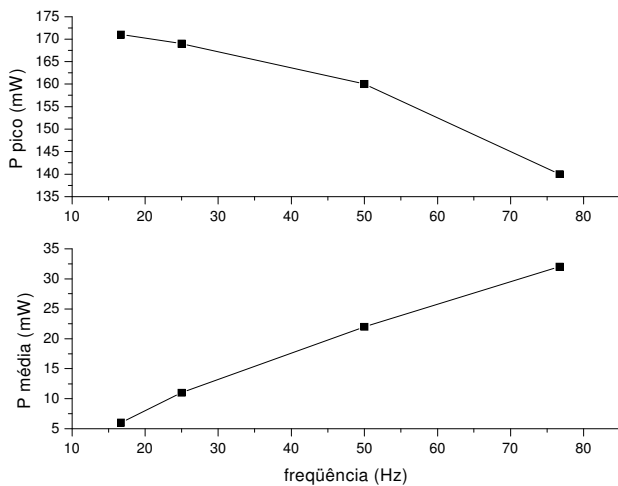


Fig. 7: Potências média e pico em função da frequência de bombeamento.

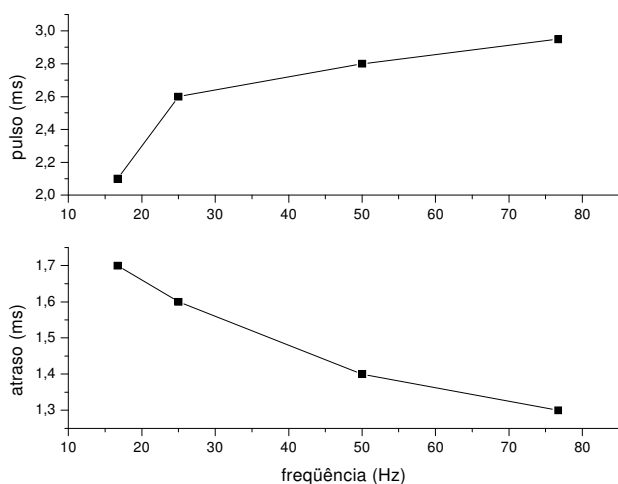


Fig. 8: Largura do pulso do laser e atraso do pulso em função da frequência de bombeamento.

REFERÊNCIAS

- [1] Ossoff RH, Reinisch L, "Chapter 12: Laser Surgery: Basic Principles and Safety Considerations", in *Otolaryngology Head and Neck Surgery*, editado por Charles Cummings, Charles W. Cummings M. D., John M. Fredrickson M. D., Charles J. Krause
- [2] Nikitichev AA, Stepanov AI, "2- μ m lasers for optical monitoring", *J. Opt. Technol.* 66 (8), 718-723 (1999)
- [3] Huffaker RM, Reveley PA, "Solid-state coherent laser radar wind field measurement systems", *Pure Appl. Opt.* 7, 863-873 (1998)
- [4] Taczak TM, Killinger DK, "Development of a tunable, narrow-linewidth, cw 2.066- μ m Ho:YLF laser for remote sensing of atmospheric CO₂ and H₂O", *Appl. Opt.* 37 (36), 8460-8476 (1998)
- [5] Kubo TS, Kane TJ, "Diode-pumped lasers at five eye-safe wavelengths", *IEEE J. Quant. Electron.* 28 (4), 1033-1040 (1992)
- [6] Elder IF, Payne MJP, "Lasing in diode-pumped Tm:YAP, Tm,Ho:YAP and Tm, Ho:YLF", *Opt. Comm.* 145, 329-339 (1998)
- [7] Hemmati H, "2.07- μ m cw diode-laser-pumped Tm,Ho:YLiF₄ room-temperature laser", *Opt. Lett.* 14 (9), 435-437 (1989)
- [8] Barnes NP, Rodriguez WJ, Walsh BM, "Ho:Tm:YLF laser amplifiers", *J. Opt. Soc. Am. B* 13 (12), 2872-2882 (1996)
- [9] Baronti B *et al.*, "Room temperature 2 μ m Tm,Ho:YLF laser", *Optics and Laser in Engineering.* 39, 277-282 (2003)
- [10] Honea *et al.*, "115-W Tm:YAG diode-pumped solid-state laser", *IEEE J. Quant. Electron.* 33 (9), (1997)
- [11] Budni PA *et al.*, "High-power/high-brightness diode-pumped 1.9- μ m thulium and resonantly pumped 2.1- μ m holmium lasers", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 6 (4), 629-635 (2000)
- [12] Dergachev A, Moulton PF, "High-Power, High-Energy Diode-Pumped Tm:YLF-Ho:YLF-ZGP Laser System", *Advanced Solid-State Photonics, TOPS Vol. 83*, 137-141, Optical Society of America, 2003
- [13] Braud A *et al.*, "Properties of the 1.5 and 2.3 μ m laser emissions of various tm doped fluoride crystals codoped with Tb or Yb ions", *OSA TOPS Vol.26 Advanced Solid-State Lasers*, Optical Society of America, 1999
- [14] Doualan JL, Moncorge R, "Laser crystals with low phonon frequencies", *Ann. Chi. Sci. Mat.* 28(6), 5-10 (2003)
- [15] Braud A *et al.*, "Energy-transfer processes in Yb:Tm-doped KY₃F₁₀, LiYF₄, and BaY₂F₈ single crystals for laser operation at 1.5 and 2.3 μ m", *Phys. Rev. B* 61(8), 5280-5292 (2000)
- [16] Pinto JF, Esterowitz L, "Tm³⁺:YLF laser continuously tunable between 2.20 and 2.46 μ m", *Opt. Lett.* 19 (12), 683-685 (1994)
- [17] Diening A, Möbert PEA, Huber G, "Diode-pumped continuous-wave, quasi-continuous-wave, and Q-switched laser operation of Yb³⁺,Tm³⁺:YLiF₄ at 1.5 and 2.3 μ m", *J. Appl. Phys.* 84 (11), 5900-5904 (1998)
- [18] Wetter NU, Ranieri IM, de Matos PSF, Courrol LC, Morato SP, Vieira Jr ND, "Lasers de Neodímio em cristais mistos de LuYLF e GdYLF, bombeados por diodo de 20 watt", *Anais do X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica*, 412-415, 2002