PRODUÇÃO TECNICO CIENTÍFICA DO IPEN DEVOLVER NO BALCÃO DE EMPRÉSTIMO

Lasers de Neodímio em Cristais Mistos de LuYLF e GdYLF, Bombeados por Diodo de 20 Watt

Nikłaus Ursus Wetter, Izilda Márcia Ranieri, Paulo Sergio Fabris de Matos, Lilia Coronato Courrol, Spero Penha Morato, Nilson Dias Vicira Jr.

Centro de Lasers e Aplicações, IPEN/SP, Cidade Universitária, R. Travessa R 400, 05508-900 São Paulo - SP

Resumo – Na procura por novos materiais laser mais eficientes, o Centro de Lasers e Aplicações do IPEN/SP investigou cristais de YLF nuistos com gadolínio e lutécio e dopados com neodímio. Observou-se uma série de características inéditas com grande potencial em aplicações laser, como um aumento da largura de banda (caso do LuYLF) ou maior coeficiente de segregação de neodímio (caso do GdYLF). Embora estas características já estejam presentes nos cristais puros de LuLF e GdLF, estes apresentam desvantagens não presentes nos cristais mistos: alto custo do primeiro e má qualidade óptico do segundo.

Palaveras-chares – cristais laser, lasers bombeados por diodo.

I. INTRODUÇÃO

Lasers baseados em materiais sólidos têm vantagens distintas sobre lasers que utilizam gases ou líquidos, uma vez que a robustez inerente ao meio sólido proporciona uma vida operacional quase infinita [1]. Porém, os lasers convencionais, bombeados por lâmpadas tipo arco ou "flash", estão longe de utilizar totalmente esta propriedade. Estas lâmpadas têm vida operacional de apenas aigumas centenas de horas, enquanto os fasers de semicondutor têm vida útil de dezenas de milhates de horas. Além disso, as fontes clétricas de alta tensão para estas lâmpadas são ineficientes, grandes e precisam na maioria dos casos de refrigeração, especialmente no caso dos lasers de alta potência. Entre as maiores vantagens dos lasers de semicondutor estão a sua eficiência na conversão elétrica para ótica (50 %) e a possibilidade de bombeamento de lasers de estado sólido. A descarga no gás das lâmpadas tem uma emissão de banda larga que quase sempre tem uma sobreposição pobre com o espectro de absorção discreto dos ions dopantes nos cristais a screm bombeados. Como resultado, em torno de 90 % da energia de bombeamento da lâmpada não contribui para a operação laser do cristal e é convertida em calor, que precisa ser removido com refrigeradores caros e de grande porte.

A partir da década de 80, os lasers de diodo começaram a ser utilizados como fontes práticas de bombeamento, quando foi feito um grande esforço para aumentar a sua potência de saída. Este objetivo foi atingido, unindo uma grande quantidade de pequenos diodos emissores (em torno de vinte) em um único pacote com maior abertura de emissão. Estes arranjos de diodos laser podem ser tanto unidimensionais (diodos enfileirados mima única dimensão, chamados de barra de diodo) quanto bidimensionais (barras empilhadas). As potências de saida dos diodos oferecidos pelos diversos fabricantes são, dependendo do comprimento de onda de emissão, entre 1 W e 60 W contínuo para diodos do tipo barra e entre 20 W e 10000 W para diodos QCW do tipo barras empilhadas. Os lasers de semicondutor têm banda de emissão estreita e podem, na sua maioria, ser sintonizáveis através do controle da temperatura. Deste modo, pode-se sintonizar o comprimento de onda de emissão com o comprimento de onda de absorção do cristal. O resultado é eficiência na utilização da energia de uma alta bombeamento. Assim, obtém-se rotineiramente eficiências de conversão ótico (bombeamento) para ótico (emissão do cristal) em tomo de 60 % (laser de Nd:YAG, [2]) enquanto, utilizando-se lâmpadas do tipo "flash", estas eficiências são tipicamente de 1 % a 2 %. Essa melhor ntilização da energia de bombeamento diminui os efeitos detrimentais termo-ópticos como birrefringência térmica e lente térmica que são devidos ao calor em excesso gerado no cristal [3]. Por sua vez, o resultado disso é uma melhor qualidade ótica do feixe e a possibilidade de obtenção de maiores freqüências de repetição de puísos sem fratura do cristal por tensão termicamente induzida. Finalmente, os fasers bombeados por diodo apresentam ruído muito menor e, portanto, maior estabilidade do que os lasers bombeados por tâmpada. Adicionando as vantagens ao pequeno tamanho do próprio diodo, obtém-se um arranjo laser compacto, de alta eficiência e qualidade ótica, prático e que inclui todas as propriedades vantajosas des sistemas convencionais.

O mais comum meio laser é o Nd:YAG (Y3Al3O12 dopado com Neodímio) devido à sua combinação de características óficas, térmicas e mecânicas favoráveis [4]. Outro cristal muito utilizado em arranjos bombeados por diodo é o Nd:YLF (YLiF4) que apresenta uma capacidade de armazenamento de energia maior do que o Nd:YAG e, portanto, permite mais altas potências de saída no modo pulsado. O nosso grupo começou a adquirir conhecimento na área de bombeamento por diodo semicondutor de alta potência em 1995 quando foi desenvolvido um protótipo de laser de Nd:YLF bombeado por diodo com um cristal crescido no nosso laboratório. Desde então estamos tentando desenvolver lasers cada vez mais potentes e eficientes. Para este fim estamos trabalhando em duas frentes: 1) cristais com propriedades methores para o bombeamento por diodo semicondutor e

WETTER, N. U. (Docente); Ranieri, I. M. (Outro Participante); Matos, P. S. F. (Egresso); COURROL, L. C. (Outro Participante); MORATO, S. P. (Docente); Vieira Jr., N. D. (Docente): Lasers de neodímio em cristais mistos de LuYLF e GdYLF, bombeados por diodo de 20 Watt; X Simósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica; 2002; ; 1; ;; 412; 415; X Simósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica; Recife - PE; BRASIL; Português; ; Impresso; ;

9299

2) arranjos ópticos de cavidades laser mais eficientes. Em termos de cristais estamos atualmente investindo em cristais com qualidade óptica melhor, largura de banda maior e concentração maior de neodimio. Uma largura de banda maior tem diversas vantagens, como melhor absorção da radiação da largura de banda do diodo, intervalo de sintonia maior e geração de pulsos curtos [5,6,7]. Maior concentração de neodímio é essencial quando o objetivo é desenvolver lasers de alta eficiência. Os lasers de diodo de alta potência emitem um feixe laser de baixíssima qualidade que, mesmo depois de ser reconfigurado através de uma óptica complexa, ainda apresenta uma qualidade mais que 2000 vezes pior do que um feixe gaussiano ($M^2 > 2000$). Portanto, o comprimento de interação entre o feixe de bombeamento e o feixe laser intracavidade é reduzido a tal ponto que somente um meio absorvedor pode ativo fortemente aproveitar eficientemente a radiação do diodo. As características desejáveis do meio ativo encontram-se em cristais de LuLF (ampla largura de banda) e GdLF (maior coeficiente de segregação de neodímio). Porém, lutécio é um material muito caro e que não incorpora muito neodímio enquanto os cristais de GdLF apresentam geralmente qualidade inferior em comparação com o cristal conhecido de YLF.

O Grupo de Lasers e Aplicações do IPEN/SP tem desenvolvido um trabalho inédito com cristais mistos de GdYLF e LuYLF que foi capaz de superar as desvantagens acima citadas, gerando uma grande quantidade de resultados inéditos que exploram as qualidades destes novos cristais. Neste trabalho apresentamos resultados inéditos da operação laser destes cristais sob bombeamento de alta potência com diodo de 20 Watt.

II. O SISTEMA LASER

No crescimento dos cristais utilizou-se fluoretos de terras raras preparados de duas maneiras, a partir dos respectivos óxidos pelo método de hidrofhiorinação em atmosfera de HF ou a partir de fluoretos comerciais que eram adicionados no cadinho e fundidos em uma atmosfera de CF4 antes do processo de crescimento. Os cristais foram crescidos pelo método de Czochralski em dois tipos de sistemas segundo o tipo de aquecimento, indutivo ou resistivo. Estes eram confeccionados em aço inox com paredes duplas, refrigerados à água e permitiam a operação em vácuo. Como procedimento usual, os materiais eram aquecidos a vácuo até 500-600 °C, para a eliminação de água e oxigênio que pudessem estar absorvidos no material ou nos componentes do forno, e preenchido com o gás sob o qual se processava o crescimento. Para o sistema $LiF-YF_3-LuF_3$ obteve-se cristais de LiY1-xLuF4 (x=31, 47,3 e 75 mol%) dopados com 2,3 e/ou 2,7 mol% de neodímio no melt. Os cristais foram crescidos com velocidades de puxamento entre 0,5-1 min/h e as velocidades de rotação foram de 20-25 pm, em almosfera de argônio ou CF4. Os coeficientes de segregação obtidos para o lutécio e para o ltrio são próximos de um e para o neodímio é de 0,33, mantendo-se inalterado em relação à razão Y/Lu [8,9]. Os cristais de LuYLF apresentam a vantagem de preservar a maior largura de banda do LuLF em relação ao YLF, além de ser mais barato do que o cristal de LuLF. Porém, uma maior quantidade de lutécio impede uma incorporação de uma alta concentração de neodímio, limitando a dopagem máxima em cristais de LuLF a menos de 0,8 mol%.



Fig. 1: Largura de banda do Nd:LuYLF em função da concentração do lutécio.

No caso do sistema LiF-GdF₃-YF₃, as melhores condições para o crescimento dos cristais foram obtidas utilizando-se fluoretos comerciais, livres de depósitos de carbono, em uma atmosfera de CF₄. Foram obtidos dois cristais com qualidade óptica de LiGd_{1-x-y}Y_xNd_yF₄ (x = 50 e 75 mol%, y = 2.7 mol%). Os cristais foram crescidos com uma velocidade de puxamento de 0,6 mm/h e 8 rpm na direção [100]. Os coeficientes de segregação medidos para o gadolínio e para o ítrio foram próximos da unidade e para o neodímio foi de 0,4, independente da razão Gd/Y [10]. É importante notar que este coeficiente de segregação é maior do que no YLF puro, permitindo assim, uma maior dopagem com neodímio, o que é de alto interesse para aplicações de lasers bombeados por diodo semicondutor.

Os diodos do tipo barra têm abertura de emissão com aproximadamente 5 µm de altura e 1 cm de largura, assim, ângulos com divergência de gerando aproximadamente 40° x 10°. Portanto, o feixe é quase limitado por difração numa dimensão, enquanto na outra, ele é milhares de vezes pior. Este é a maior desvantagem dos lasers de diodo e, por este motivo, extensa pesquisa está sendo atualmente efetuada para controlar o perfil espacial do feixe com a utilização de microlentes montadas diretamente na abertura do diodo laser [11]. O problema principal desta assimetria do feixe de salda é o fato de necessitar uma ótica complexa para a focalização do feixe de bombeamento dentro do cristal faser. Existem basicamente dois métodos de bombear um bastão de cristal

laser com diodo semicondutor: 1) longitudinalmente, ou seja, no sentido do eixo do bastão, e 2) transversalmente, Utilizamos seja, lateralmente. bombeamento ou longitudinal porque ostes arranjos costumam oferecer maiores eficiências devido à melhor sobreposição do feixe de bombeamento com o feixe do meio ativo. Geralmente, na técnica de bombeamento longitudinal, o modo do laser tem a mesma área de seção do modo de bombeamento [12]. Portanto, obtém-se uma maior intensidade de bombcamento para a mesma potência de saída do diodo. Esta maior densidade de potência torna-se relevante quando o objetivo é a obtenção de alta potência de saída ou alto ganho no cristal laser. Teoricamente, o máximo ganho é obtido quando o feixe de bombeamento tem o menor diâmetro, enquanto a máxima potência de saída é um compromisso calculado, entre outros, a partir do máximo ganho, da densidade de centros ativos e das perdas. Em particular, o volume efetivamente ativo dentro do bastão é limitado pelo parâmetro confocal do feixe de bombeamento.

Introduzinos um modificador de perfil de feixe de diodo laser (ver Fig. 2) para conseguir um feixe com aspecto menos elíptico e com qualidade de feixe mais homogênea perpendicular ao sentido de propagação [13]. Este feixe garante uma maior sobreposição com o feixe intraeavidade. Após corrigir os efeitos provocados pela curvatura da barra de diodo foi colocado um arranjo óptico -(Fig. 2) que re- configura a emissão do diodo.



Fig. 2: Arranjo de bombeamento dos cristais mistos com YLF. O X substitui o gadolínio ou o lutécio.

Foram feitas medidas de qualidade e potência de feixe na posição do cristal após a lente de focalização com $\xi_y = 2.5$ cm. Utilizamos para este fim um diodo que emite cm $\lambda = 792$ nm. A emissão deste diodo foi re-configurado em três colunas conforme Fig. 3. Este diodo apresentava (com correção do efeito da curvatura da barra e depois do modificador de perfil de feixe) fatores de qualidade de $M_r^2 = 135$ c $M_r^2 = 82$ (ver Fig. 4), potência de 15,6 Watt na cristal para 20 Watt na saída do diodo.

Os cristais usados foram crescidos no Laboratório de Crescimento de Cristais do CLA pelo método de Czochralski [14] e cortados para ter caminho óptico perpendicular ao eixo c e com um a três comprimentos de absorção (I/α). Na Fig. 2 está representada a propagação de um feixe em um cristal com índice de refração de 1,5 e portanto, ângulo de Brewster de aproximadamente 56°. As

faces são contadas em ângulo de Brewster para polarização πc são então polidas.



Fig. 3: Perfil do feixe na posição do eristal com a correção da curvatura da barra de diodo e o modulador de perfil de feixe configurado para três colunas.



Fig. 4: Medida da qualidade do feixe no local do cristal.

Foram testados cristais de Nd:GdYLF e Nd:LuYLF com concentração de acordo com a TABELA L. Estas concentrações foram medidas com técnicas de EDS e fluorescência de raio-x e contém erro 0,2 mol%.

TABELA 1: CONCENFRAÇÃO DE NEODÍMIO, LUTÉCIO E GADOLÍNIO NOS CRISTAIS MISTOS.

	Neodímio	Lutécio	Gadolínio
Nd:LuYLF(1)	~0,8 mol%	30 mol%	
Nd:LuYLF (2)	0,8 mol%	50 mol%	
Nd:LuYLF (3)	~0,8 mol%	75 mol%	1
Nd:GdYLF(4)	1,1 mol%		50 mol%
Nd: GdLF (5)	1,3 mol%		100mol%
Nd:YLF (6)	1,3 mol%		

Devido à alta eficiência de absorção e o alto brilho obtido durante o bombeamento por diodo é preciso ajustar a carga térmica no cristal de tal maneira que ele opere bem abaixo do limite de fratura por tensão. Para garantir a integridade dos cristais operamos todos os meios ativos com baixo ciclo útil utilizando pulsos de 3 ms e 23 Hz de taxa de repetição. A dissipação do calor restante foi efetuada através de uma plaea refrigeradora de cobra que foi mantida a 20 graus Celsius. O ressonador laser era composto por um espelho de fundo curvo (raio de curvatura de 20 cm), totalmente refletor em 1047 nm e altamente transmissor (T = 92%) para a freq ência de bombeamento de 792 nm. O comprimento do ressonador era de 4 cm e o espelho de saída era plano e tinha transmissão de 14 % no comprimento de onda de 1047 nm.

Todos os cristais testados apresentaram limiar de operação laser baixo e entraram facilmente em operação laser. O modo espacial do feixe de saida era geralmente multimodo, porØm de ordem baixa, apresentando sempre uma qualidade de feixe com M² abaixo de 10. Para cada cristal foi otimizada a potência de saída atravØs do ajuste da temperatura da placa de refrigeração termoclØtrica do diodo. Os resultados da potência de saída encontram-se na TABELA 2.

TABELA	2:	POT'NCIA	DE		SA DA	0	BTIÐA	PARA	UMA
POT NCIA	DĖ	ENTRADA	DE I	5	W EM	792	nm E	COMPRI	MENTO
DAS AMO	STR.	AS.							

	Comprimento do cristal	Potência de saída
Nd:LuYLF(1)	9 mm	4,0 W
Nd:LuYLF (2)	9 mm	3,1 W
Nd:LuYLF (3)	5,8 mm	3,1 W
Nd:GdYLF(4)	3,5 mm	4,0 W
Nd: GdLF (5)	3,9 mm	3,7 W
Nd:YLF (6)	9,5 mm	5,0 W

Conforme esperado e explicado na discussão anterior, o cristal com a menor concentração de lutØcio apresenta os melhores resultados em termos de potência de saída, entre os cristais mistos com lutØcio, uma vez que ele incorpora melhor o neodímio. Conforme pode ser visto na Fig.1, a porcentagem de 30 mol% de lutOcio jÆ permite um aumento considerÆvel da largura de banda. Entre os cristais com gadolínio Ø visível a melhora em termos de qualidade óptica nos cristais mistos: embora o cristal misto (YGdLF) apresente uma concentração menor de neodímio do que o cristal puro (GdLF) e um comprimento inadequado (apenas 83 % da radiação do diodo absorvida) ele fomece uma potência de saída maior. Este cristal misto estÆ, portanto, com qualidade óptica similar ao YLF, alØm de oferecer um potencial para incorporação de alta quantidade de neodímio.

III. CONCLUS ES

Foram testados e comparados cristais mistos inØditos de LuYLF e GdYLF. Os cristais mistos de LuYLF apresentam uma considerÆvel economia de custos sem comprometer o ganho em termos de largura de banda obtido com este material. Portanto, eles representam uma alternativa economicamente viÆvel entre os cristais de alto ganho para geração de pulsos ultracurtos. Os cristais mistos de GdYLF demonstraram qualidade óptica superior aos cristais puros de GdLF. Para tirar pleno proveito deste novo material Ø preciso ainda crescer novos cristais com dopagem de neodímio maior do que o mÆximo possível em YLF, o que deveria ser possível segundo o coeficiente de segregação do nextímio no GdYLF. Caso estas expectativas se confirmem, este novo material deverÆ superar o YLF em quase todas as aplicações laser.

REFER®NCIAS

- 1 W. Kocchner, Solid-State Laser Engineering, Chap. 6, Editora Springer, New York, 1988.
- 2 S.C. Tidwell et al., Efficient, 15 Woutput power, diodc-end-pumped Nd:YAG taser, Opt. Lett, pp.584-586 (1991). 3 W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Chap. 7, Editora
- Springer, New York, 1988.
- 4 W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Chap. 8, 9, Editora Springer, New York, 1988.
- 5 E.P. Maldonado, E. A. Barbosa, N. U. Wetter. L.C. Courrot, I. M ieri, S. P. Morato e N. D. V. Vieira Jr. Modelocking Operation of Nd:LuYLF", E. P. Maldonado, E. A. Ranieri, Barbosa, N. U. Wetter, L. C. Courrol, I. M. Rainciri, S. P. Morato and N. D. Vieira Jr., Optical Engineering, 40, issue 8 (2001), 1573-1578,).
- 6 Wetter, N. U.; Matos, P. S. F.; Ranieri, I. M.; Courrol, L. C.; Morato, S. P., Single Frequency, Continuously Tunable, Diode-Pumped Nd:GdYLF Microlaser , Optics Communications, 2002, to be published.
- 7 Maldonado, E. P.; Barbosa, E. A.; Wetter, N. U.; Ranieri, I. M.; Courrol, L. C.; Morato, S. P.; Vieira Jr, N. D. TechnologyWorld Nd:LuYLF Generates 415 Pulses Photonics Spectra, Briefs: EUA, 2002
- 8 I.M. Ranieri, S.P. Morato, L.C. Courrol, H.M. Shihomatsu, A.H.A. Bressiani, N.M.P. Moraes, Growth of LiY(1-x-y)LuxNdyF4 crystals for optical applications . J. Crystal Growth, 209 (2000) 90010.
- Ranieri, S.P. Morato, A.H.A. Bressiani, L.C. Courrol, E. P. Małdonado, N.U. Wetter, N.D. Vieira Jr., S.L. Bałdochi, K. Sliimamura and T. Fukuda, "Growth of LiY_xLu_{1-x}F₄ crystals (x= 0, 25, and 50 mol%) under CF4 atmosphere", J. Alloys and Compounds, in press.
- 10 I.M. Ranieri, K. Shimamura, K. Nakano, T. Fujita, L.C. Courtol, S.P. Morato, T. Fukuda, Growth and characterization of LiGd_{1-xy}Y_xNd_yF4 single crystals. J. Crystal Growth, 217 (2000) 145-150.
- 11 W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Chap. 3, Editora Springer, New York, 1988.
- 12 E.P. Maldonado, N.D. Vieira Jr., Optimization of theactive medium length in longitudinally pumped continous-wave lasers, J. Opt. So J. Opt. Soc. Am. B 12, November (1995).
- 13 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 14 I M Ranieri, Crescimento de cristais de Li Y_{x3} TR_xF₄:Nd (TR= Lu ou
- Gd) para alplicações ópticas , tese de doutorado IPEN 2001