GERAÇÃO DE PULSOS DE LASER DE CO₂ Q-SWITCHED COM UMA CAVIDADE INÉDITA FEITA DE UM PAR DE ESPELHOS PLANOS E UMA LENTE POSITIVA

M.L. Oliveira¹; M.A.S. Minucci²; N.A.S. Rodrigues^{2*}

¹ Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, 12.228-900 São José dos Campos, SP ²Instituto de Estudos Avançados, Rod dos Tamoios, km 5,5, 12.228-001, 12.228-970, São José dos Campos, SP

Recebido: 3 de Maio, 2007, 2007; Revisado: 12 de Junho, 2007

Palavras-chave: laser de CO₂, Q-Switching, cavidade ressonante, matriz ABCD.

RESUMO

Foi desenvolvida uma nova configuração de cavidade ressonante, de construção extremamente simples, que permite a operação em regime de Q-switching em um laser de CO_2 bombeado continuamente. Esta cavidade ressonante tem em um lado um espelho plano de acoplamento de germânio, e de outro lado uma lente positiva e um espelho plano 100% refletor, que emula um refletor total côncavo. O feixe do laser é focalizado sobre o espelho 100% e um "chopper" próximo deste estpelho para chavear a cavidade ressonante. Foram obtidas taxas de repetição na faixa de 45 a 1090 Hz, potência de pico na faixa de 35 a 1400W e largura de pulso (FWHM) na faixa de 400 a 940 ns.

ABSTRACT

It was developed a novel resonator configuration to allow the operation in Q-switching regime with a continuously pumped CO_2 laser. This resonator has in one side a flat germanium coupling mirror and in the other side a positive lens and a flat 100% reflector mirror, emulating a concave total reflector. The laser beam is focused over the 100% mirror and a chopper is placed close to this position to switch the resonator shut-and-open. It was obtained repetition rates from 45 to 1090 Hz, peak power from 35 to 1400 W and pulsewidth (FWHM) from 400 to 940 ns.

1. INTRODUÇÃO

Há uma série de aplicações de laser nas quais é desejável uma operação em regime pulsado com altas taxas de repetição e baixas energias por pulso, porém com altas potências de pico. Como exemplo destas aplicações têm-se o corte e a furação de materiais refratários ^{[1],} a produção de nanopartículas por ablação a laser [2] e a evaporação de materiais para separação isotópica [3], todas elas desenvolvidas no IE-Av. O laser utilizado normalmente nestas aplicações é o de cobre. No entanto, o regime descrito acima pode ser obtido com um laser de CO_2 operando em regime de *Q-switching*, que é de operação muito mais simples que a de um laser de cobre e com custo uma ordem de grandeza menor. A diferença fundamental entre os dois lasers é a região do espectro em que emitem, visível para o laser de cobre (512 nm e 578 nm) e infravermelho distante para o de CO_2 (10,6 μ m), o que, dependendo do material, pode ser vantajoso para um ou para outro laser.

Neste trabalho será descrito um laser de CO_2 desenvolvido no IEAv, que utiliza uma cavidade ressonante inovadora, de implementação extremamente simples, que permite operação em regime de *Q*-switching, em operação estável e no modo fundamental TEM₀₀. Este laser operou com taxa de repetição de até 1,4 kHz, com pulsos de 1,4 kW de potência de pico e duração de 400 ns (largura a meia altura), nas melhores condições.

2. A CAVIDADE RESSONANTE

É denominado de *Q*-switching o regime de operação em que um laser é bombeado continuamente (ou com pulsos longos) mas sua cavidade ressonante é obturada, de modo que não haja ação laser até que a inversão de população atinja o valor máximo; subitamente o dispositivo que oblitera a cavidade é aberto, de modo a permitir ação laser, e um pulso de alta potência de pico é gerado [4]. Este regime é muito utilizado para se obter operação pulsada a altas taxas de repetição, a partir de laser que originalmente operam em regime contínuo.

O nível superior de laser da molécula de CO_2 tem um tempo de vida longo, o que a torna atraente para operação no regime de *Q-switching* [5]. Vários mecanismos são empregados para operar um laser de CO_2 em regime de *Q-switching*, sendo que os mais comuns são os que empregam espelhos rotativos ou obturadores intracavidade. No primeiro caso, um dos espelhos do laser é montado no eixo de um motor que gira ou oscila em torno do eixo, sendo que a operação laser só é permitida quando os dois espelhos se encontram alinhados, dentro de uma certa tolerância angular.

Para a operação em regime de *Q*-switching com laser de CO₂, o tempo de chaveamento (tempo que a cavidade passa de totalmente fechada para totalmente aberta) deve ser da ordem de alguns microsegundos. No caso do uso um obturador intracavidade, é introduzido no interior da cavidade um telescópio formado por duas lentes convergentes, de magnificação unitária, e o disco do *chopper* é colocado no foco do telescópio [6]. Desta maneira obtêm-se tempos de

^{*} nicolau@ieav.cta.br

chaveamento curtos usando motores elétricos convencionais para acionamento do *chopper*.

Foi demonstrada no IEAv uma configuração muito simples de cavidade ressonante para operação em *Q-switching* de um laser de CO_2 , que utiliza um par de espelhos planos e de somente uma lente convergente no interior da cavidade, em vez de um telescópio, como mostrado na Fig. 1. Nesta configuração, o conjunto da lente com o espelho 2 emula um espelho esférico, e ajustando de maneira adequada as distâncias entre os componentes ópticos, pode-se obter operação estável [7].



Figura 1 - Diagrama da cavidade ressonante.



Figura 2 - Seqüência equivalente de abertura e lentes para a cavidade.

Uma cavidade ressonante de um laser é considerada estável se existe ao menos um caminho fechado para um feixe de luz se propagando dentro desta cavidade. Para testar este critério é utilizada óptica geométrica em conjunto com as matrizes ABCD [8]. A matriz ABCD para um feixe de luz que se propaga no espaço livre por uma distância d é dada por

e o efeito de uma lente de distância focal f sobre um feixe de luz é descrito pela matriz

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$
 (2)

Se for indicado por d_1 a distância do espelho 1 até a lente e por d_2 a distância do espelho 2 até a lente, uma volta completa de um feixe dentro da cavidade será descrita pelo produto de matrizes referentes a cada elemento óptico.

Para que a cavidade seja estável, é necessário que o traço da matriz que representa uma volta completa no interior da cavidade esteja entre os limites

$$-1 < \frac{1}{2}(A+D) < 1$$
 (3)

em outras palavras, temos

$$-1 < \frac{f^2 - 2d_1f - 2d_2 + 2d_2d_1}{f^2} < 1 \tag{4}$$

que é a condição de estabilidade para a cavidade diagramada na Fig. 1.

Para o laser desenvolvido no IEAv, foi usada a configuração da Fig. 2 para calcular os limites para os quais a cavidade é estável. A distância d1 entre o espelho de acoplamento e a lente é de 1,5 m, a distância focal é de 127 mm e a distância d2 entre a lente e o espelho 100% foi variada. Foi verificado que a cavidade é estável para d2 na faixa de 127 mm a 139 mm. Para outros valores a cavidade é instável.

O modo fundamental de oscilação de uma cavidade estável é o TEM₀₀, para o qual a distribuição de intensidade é dada por uma função gaussiana. Para determinar a distribuição de intensidade nesta cavidade foi utilizado o método de Fox e Li [9], considerando a seqüência equivalente de aberturas e lentes mostrada na Fig. 2.

3. ARRANJO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

O meio ativo deste laser é formado por um tubo de descarga feito em vidro borosilicato com 1,2 m de distância entre eletrodos, diâmetro interno de 10,5 mm, com uma camisa d'água de refrigeração. A descarga é mantida por uma fonte de alta tensão regulável de 0-20 kV, 0-100 mA, e a corrente elétrica é limitada por um resistor de lastro de 100 k Ω em série com o tubo de descarga. Uma das flanges que suporta e veda o tubo de descarga também suporta o espelho de acoplamento plano de Ge, com 85% de refletividade. A outra flange suporta a lente de ZnSe com 127 mm de distância focal. A entrada de gás é feita pelas flanges e a remoção do gás é feita por uma bomba de vácuo mecânica no centro do tubo. O espelho plano total, de cobre, é suportado por uma mesa óptica que permite o ajuste angular e a distância entre este espelho e a lente. O chopper foi construído usando um motor DC de até 12000 rpm, alimentado com 9 V e sem carga. Os discos do chopper têm 100 mm de diâmetro e foram cortados a laser de uma placa de alumínio anodizado, de 0,3 mm de espessura, tendo duas, quatro e seis fendas equidistantes de 10 mm de comprimento por 0,5 mm de largura, discos de duas fendas de 0,75 e 1,00 também foram confeccionados. A largura de 0,5 mm da fenda foi obtida calculando a formação do modo na cavidade, usando o método de Fox e Li, e verificando a largura do feixe de laser sobre o espelho total de cobre.

Removendo o *chopper* da cavidade, o laser pode operar em regime contínuo. Variando a corrente elétrica e a pressão de trabalho, foi possível parametrizar a operação do laser em regime contínuo e otimizar sua operação. Para obter a potência de emissão do laser foi utilizado um medidor de potência Ophir, modelo 30A-SH. A Fig. 3 mostra o comportamento da potência do laser em relação a pressão e corrente. A melhor condição de operação obtida foi com pressão de 16 torr, corrente de 50 mA, e otimizando o alinhamento da cavidade o laser operou com uma potência de 30 W. É interessante observar que esta cavidade se mostrou bastante seletiva quanto ao modo de oscilação, mesmo com o espelho traseiro desalinhado o suficiente para a potência cair à metade do máximo, o modo do laser permaneceu semelhante ao fundamental TEM_{00} .



Figura 3 - Comportamento do laser em regime contínuo.

Com as pás do chopper colocadas a cerca de 2 mm do espelho total, foram realizadas várias experiências, mantendo a corrente e a pressão que fornecem a melhor condição de operação em regime contínuo. Foi variada a tensão de alimentação do motor do chopper e foi monitorada a potência do laser usando um detetor piroelétrico Coherent P3-01, conectado a um osciloscópio Tektronix TDS 3052. A figura 4 mostra um sinal típico do laser operando em regime de Qswitching, onde pode-se observar um pico inicial com uma largura de pulso à meia altura da ordem de 500 ns, seguido por uma cauda com duração da ordem de 3 µs, determinada pelo tempo de abertura da fenda da pá do chopper. A potência de pico foi obtida integrando no tempo o sinal do detetor piroelétrico, multiplicando pela freqüência de operação e comparando com a potência média medida usando o medidor da Ophir. Nas figuras 5 e 6 são mostradas o perfil do pulso de laser contra o tempo, para diferentes freqüências de rotação do chopper. Embora haja uma indicação de que a largura do pulso esteja próxima do limite inferior que se pode chegar com este dispositivo, a potência de pico mostra uma tendência de crescimento ainda, com o aumento da freqüência do chopper.



Figura 4 - Pulso típico do laser.



Figura 5 - Pulsos de laser obtidos com as pás do chopper de duas fendas de 0,5 mm.



Figura 6 - Para 420 Hz, pá com 4 fendas de 0,5 mm, e para 640 e 910 Hz pás com 6 fendas de 0,5 mm.

4. CONCLUSÕES

A cavidade ressonante apresentada neste artigo é extremamente simples e pode ser implementada em qualquer laser de CO_2 de operação contínua, desde que este permita a troca do espelho côncavo total por uma lente. No caso do laser testado, foi possível variar a taxa de repetição de 45 a 1090 Hz, a potência de pico de 35 a 1400 W e a largura dos pulsos à meia altura de 400 a 940 ns. A maior potência de pico obtida foi de 1,4 kW, com o laser operando a uma freqüência do *chopper* de 467 Hz e largura de pulso de 400 ns.

Este laser, com as características acima, tem potencial de aplicações em texturização e estruturação de superfícies, em microsoldas, em ablação a laser (de dielétricos principalmente) e em estudos de propulsão a laser.

A próxima etapa no desenvolvimento deste laser é estudar a amplificação dos pulsos de laser também utilizando lasers com bombeamento contínuo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, ao CNPq e à FINEP pelo suporte financeiro parcial para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

 RODRIGUES, N.A.S.; GIÃO, M.A.P., Corte de chapa de tungstênio com laser de CuHBr. Instituto Fábrica do Milênio, 2004, <u>http://www.cimm.com.br/cimm/construtordepaginas/</u> htm/3 25 2454.htm, acessado em 02/08/2007.

- LIMA, M.S.F.; LADARIO, F.P.; RIVA, R., Appl. Surf. Science 252 (2006) 4420.
- DESTRO, M.G.; RODRIGUES, N.A.S.; NERI, J.W.; SILVEIRA, C.A.B.; RIVA, R.; SCHWAB, C., *Laser selective photoionization of rare earth*, Proceedings of The 9th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, ed. Shi Zeng, Tsinghua University Press, Beijing, p. 313-316, 2006.
- SIEGMAN, A., *Lasers*, University Science Books, Mill Valley, USA, 1986.
- DULEY, W.W., CO₂ Lasers: Effects and Applications, Academic Press, New York, USA, 1976.
- HAMADA, N.; SAKAI, T., High-power Q-switched CO₂ laser based on a fast axial gas flow system, Proceedings of SPIE, 1810, 53, 2003.
- OLIVEIRA, M.L.; RODRIGUES, N.A.S.; MINUCCI, M.A.S., Assessment of a CO2 laser operating in Q-switching regime with a novel intracavity-chopper resonator, In: Annals of Optics, XXX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, ed. N.A.S. Rodrigues, São Lourenço: Sociedade Brasileira de Física, 134, 2007.
- GOETHALS, W.A.E., *Laser beam analysis by geometrical optics*, in: The Physics and Technology of Laser Resonator, ed. D.R. Hall e P.E. Jackson, IOP, London, 143, 1989.
- JACKSON, P.E., Numerical Resonator Calculation, In: The Physics and Technology of Laser Resonator, ed. D.R. Hall e P.E. Jackson, IOP, London, 106, 1989.