

ESTUDO DA TÉCNICA DE ACOPLAMENTO DE MODOS EM UM LASER DE Nd:YLF COM BOMBEAMENTO LONGITUDINAL.

Edison Puig Maldonado* e Nilson Dias Vieira Jr.
IPEN/CNEN - São Paulo

Estudamos a geração de pulsos curtos por acoplamento de modos ativo em um laser de Nd:YLF bombeado por um laser de Argônio. Devido a este sistema ter sido previamente caracterizado, sendo os parâmetros do laser e do modulador acústico determinados, uma análise à luz da teoria de Siegman e Kuizenga pôde ser realizada com precisão. Resultados preliminares indicam que os pulsos têm largura temporal inferior à prevista pela teoria para a configuração utilizada.

INTRODUÇÃO

Para a geração de pulsos ultracurtos em lasers contínuos de Nd:YLF utilizam-se técnicas de acoplamento de modos por mecanismos ativos ou passivos.[1-4] No caso de modulação ativa de perdas, demonstra-se teoricamente que a geração de pulsos com largura temporal inferior a 20 ps, neste laser, é extremamente difícil de ser realizada. No entanto, recentemente foram relatados experimentos simples com a geração de pulsos de até 7 ps de duração, em sistemas bombeados por diodo laser. [5] Assim, buscando entender a importância do mecanismo de bombeamento e da geometria do ressonador neste regime, estudamos a geração de pulsos curtos por acoplamento de modos ativo em um laser de Nd:YLF bombeado por um laser de Argônio. Devido a este sistema ter sido por nós previamente caracterizado, sendo os parâmetros do laser e do modulador acústico determinados, uma análise à luz da teoria de Siegman e Kuizenga pôde ser realizada com precisão.

TEORIA

O regime de acoplamento de modos (ou "mode-locking" - ML) corresponde a um dos dois estados completamente organizados de operação de um laser (ao lado da operação em frequência única). Os modos longitudinais da cavidade laser são separados em frequência por $c/(2\ell')$, onde ℓ' é o comprimento óptico do ressonador e c é a velocidade da luz no vácuo.[6] O regime de acoplamento de modos ativo corresponde àquele no qual os modos longitudinais são forçados a manter uma relação fixa de fase, o que causa uma oscilação regular da intensidade de saída do laser (trem de pulsos).

No caso de um laser com alargamento homogêneo de linha (como no laser de Nd:YLF, por exemplo), o regime de acoplamento de modos requer não apenas um mecanismo que force a manutenção de uma relação fixa das fases dos modos oscilantes, mas também um mecanismo que force a oscilação de vários modos longitudinais, tal como a modulação ativa de perdas com período igual ao tempo de voo dos fótons no ressonador, $T = 2\ell'/c$.

Uma solução analítica para a largura temporal dos pulsos pode ser obtida calculando-se a transformação de um pulso através de uma volta completa no ressonador e igualando este pulso ao pulso inicial. Esta condição permite obter os parâmetros do pulso que são estacionários, para este regime. Considerando que os pulsos são descritos temporalmente por uma função Gaussiana, a largura nos pontos de meia intensidade do pulso auto-consistente, τ_P , é dada por: [6,7]

$$\tau_P = \frac{\sqrt{\sqrt{2} \cdot \ln 2}}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{\sqrt{L}/\delta}}{\sqrt{\Delta v_{axial} \cdot \Delta v_{meio}}} \quad (1)$$

onde $\Delta v_{axial} = c/(2\ell')$, Δv_{meio} é a largura em frequência, à meia altura, do ganho do meio laser, L é a perda logarítmica total intracavidade, por duplo passo, e δ é o parâmetro de profundidade de modulação, medido em radianos. Supõe-se que a modulação temporal de amplitude introduzida pelo modulador ativo, usualmente um modulador acústico, é descrita por:

$$a(t) = \cos[\delta \cdot \sin(\Omega t)] \quad (2)$$

onde $\Omega = \Delta v_{axial}/2$ é a frequência da onda de rádio-frequência que alimenta o modulador. [8]

Para o Nd:YLF (polarização π), $\Delta v_{meio} = 360$ GHz.

* Bolsista de Doutorado FAPESP - processo 91/3968-5

PROCEDIMENTO E RESULTADOS

O laser de Nd:YLF bombeado por laser de Argônio [9] foi caracterizado seguindo a metodologia descrita na referência 10, obtendo-se o valor do ganho não saturado e das perdas na cavidade. O ganho logarítmico por duplo-passo corresponde a $\Gamma_0 \cong 4$, para uma potência de bombeamento igual a 3,5 W, e as perdas logarítmicas por duplo-passo são $L_0 = 0,03$ (3%), para a cavidade sem o modulador. Neste caso, o laser apresenta uma potência de saída $P = 450 \text{ mW}$. O ressonador tem 1,5 m de comprimento (óptico), o que corresponde a $\Delta v_{\text{axial}} = 100 \text{ MHz}$.

A transmissão do modulador acústico-óptico [11] foi analisada quanto à profundidade da modulação temporal, perdas c.w. e polarização: Observou-se uma rotação de polarização de 10% por passo, independente da direção de polarização do feixe incidente. A observação deste efeito indica a presença de stress no meio de interação. Para o modulador alimentado por 2,0 W de rádio frequência, a profundidade de modulação é $\delta = 0,7$. As perdas c.w. são extremamente altas, correspondendo neste caso a $L_{AO} = 0,5$. Este alto valor de perdas reflete o baixo fator de qualidade acústico do dispositivo utilizado.

A inserção do modulador acústico-óptico no ressonador causa uma diminuição da potência de saída para $P = 150 \text{ mW}$, o que corresponde a uma perda de inserção $L_{\text{ins}} = 0,2$. Estas perdas são devidas principalmente ao efeito de rotação de polarização promovido pelo modulador acústico-óptico. Como 10% do feixe tem sua polarização rodada, por passo, e o laser tem elementos em ângulo de Brewster, as perdas são significativas.

Assim, temos: $L = L_0 + L_{\text{ins}} + L_{AO} = 0,73$ e $\delta = 0,7$. A expressão 1 fornece para a largura temporal dos pulsos: $\tau_P = (52,5 \text{ ps}) \cdot L^{1/4} / \delta^{1/2} \cong 60 \text{ ps}$.

A operação do laser no regime de acoplamento de modos foi realizada ajustando-se micrometricamente o comprimento do ressonador para que a tempo de voo dos fótons correspondesse ao período de modulação. Um ajuste fino do casamento entre as frequências pôde também ser realizado através do controle da frequência da onda de rádio-frequência fornecida para o modulador. A largura temporal dos pulsos ópticos gerados dependeu da condição de alinhamento do laser. Para um alinhamento que corresponde à máxima potência média de saída, e máxima estabilidade, os pulsos gerados têm largura temporal $\tau_P \cong 60 \text{ ps}$, como mostra a curva de autocorrelação da figura 1, o que concorda com o previsto pela teoria (expressão 1). Entretanto, efetuando-se um pequeno desalinhamento do feixe de bombeio a potência média de saída cai para um valor correspondente a 80% do anterior, observando-se simultaneamente um encurtamento significativo da largura temporal dos pulsos. Nesta condição, os pulsos apresentam larguras temporais que dependem criticamente do alinhamento, tipicamente: $\tau_P \cong 50 \text{ ps}$, como mostrado na figura 2. Pode-se obter larguras ainda menores, tipicamente $\tau_P \cong 30 \text{ ps}$, mas com um aumento da instabilidade dos pulsos. Tais pulsos somente foram observados no sistema de amostragem que dispomos, [12] não sendo possível registrá-los em uma curva de autocorrelação até o momento.

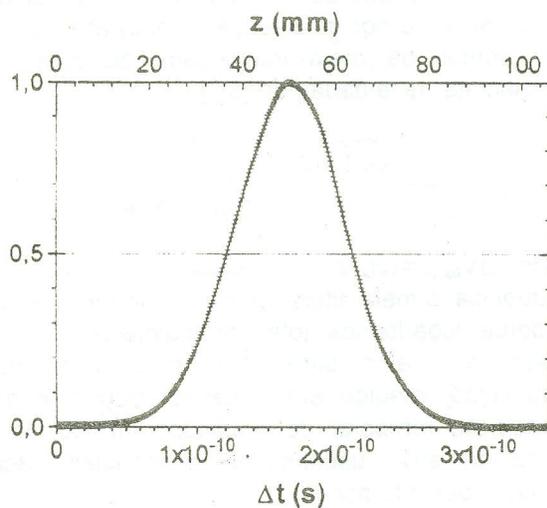


FIGURA 1. Curva de autocorrelação dos pulsos gerados por acoplamento de modos, para a configuração mais estável. A largura temporal à meia altura dos pulsos é de 64 ps.

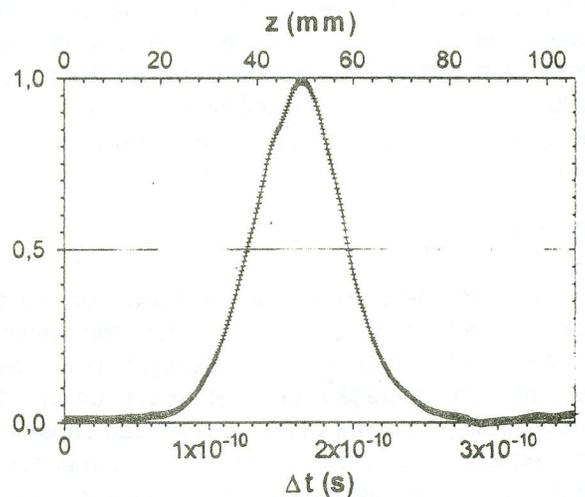


FIGURA 2. Curva de autocorrelação dos pulsos gerados por acoplamento de modos, para o alinhamento que produz pulsos mais curtos. A largura temporal à meia altura dos pulsos é de 50 ps.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O encurtamento dos pulsos observado quando o laser é ajustado para um alinhamento diferente daquele que corresponde à máxima potência média (e também máxima potência c.w.) indica a possibilidade de efeitos não-lineares estarem ocorrendo no sistema. A cintura do modo do laser na região do meio ativo é $w_0 = 100 \mu\text{m}$ e o comprimento do meio é $l = 33 \text{ mm}$. Um possível efeito é o de automodulação de fase, que alarga o espectro do pulso. [13] Efeitos de lente não-linear (*self focusing*) podem também estar presentes.

Para um laser de Nd:YLF com comprimento de ressonador típico de 1,5 m, a largura temporal dos pulsos gerados por acoplamento ativo de modos deve depender exclusivamente das perdas do ressonador, L , e da profundidade de modulação, δ , como mostra a expressão 1. No sistema investigado, o alto valor das perdas introduzidas pelo modulador ($L=0,7$) limitaram a largura dos pulsos em 60 ps. Se as perdas fossem na faixa de 20%, e com a mesma profundidade de modulação, poderíamos ter pulsos com largura temporal da ordem de 20 ps, de acordo com a expressão 1. Tal sistema seria ainda mais adequado para a observação de eventuais efeitos não-lineares no laser de Nd:YLF com acoplamento de modos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da FAPESP, sob o auxílio 93/4999-7.

ABSTRACT

We have studied the short pulse generation by active mode-locking in a Ar laser-pumped Nd:YLF laser. A theoretical analysis of this regime is carried out, based on a previous measurement of the laser and modulator parameters. Initial results show that the pulses have time width shorter than the theoretical value for this configuration.

REFERÊNCIAS

1. Bado, P.; Bouvier, M. and Scott Coe, J.; "Nd:YLF mode-locked oscillator and regenerative amplifier"; *Opt.Lett.*, vol. 12, 319 (1987)
2. Keller, U.; Miller, D.A.B.; Boyd, G.D.; Chiu, T.H.; Ferguson, J.F. and Asom, M.T.; "Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry-Perot saturable absorber"; *Opt.Lett.*, vol. 17, 505 (1992)
3. Malcolm, G.P.A.; Curley, P.F. and Ferguson, A.I.; "Additive-pulse mode locking of a diode-pumped Nd:YLF laser"; *Opt.Lett.*, vol. 15, 1303 (1990)
4. Malcolm, G.P.A. and Ferguson, A.I.; "Self-mode locking of a diode-pumped Nd:YLF laser"; *Opt.Lett.*, vol. 16, 1967 (1991)
5. Juhasz, T.; Lai, S.T. and Pessot, M.A.; "Efficient short-pulse generation from a diode-pumped Nd:YLF laser with a piezoelectrically induced diffraction modulator"; *Opt.Lett.*, vol. 15, 1458 (1990)
6. Yariv, A.; "Optical Electronics"; (1991) Holt, Rinehart and Winston Inc., N.Y.
7. Kuizenga, D.J.; Siegman, A.E.; "FM and AM Mode Locking of the Homogeneous Laser"; *IEEE J. Quant. Electron.* 6 (1970) 694
8. Koehner, W.; *Solid-State Laser Engineering*, Springer-Verlag, N.Y. (1988)
9. Maldonado, E.P.; Ranieri, I.M.; Vieira Jr. N.D.; Morato, S.P.; "Laser de Nd:YLF Bombeado Colinearmente por Laser de Argônio"; Resumos estendidos do Grupo de Óptica do XVI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada - SBF (1993)
10. Maldonado, E.P.; Nogueira, G.E.C.; Vieira Jr., N.D.; "Determination of the Fundamental Laser Parameters Using an Acousto-Optical Device"; *IEEE J. Quantum Electron.* 29, 1218 (1993)
11. IntraAction Acousto-optic Mode-Locker, model ML50-A
12. Detetor de InGaAs ultra rápido (Opto-Electronics model PD50), tempo de resposta: 50 ps; Amostrador de alta performance (Tektronics SD-26 Sampling Head), tempo de subida: 17,5 ps, taxa de amostragem: 200 kHz; Osciloscópio digital (Tektronics CSA 803). Tempo total de resposta: 53 ps
13. Duerinckx, A.J.; Vanherzeele, H.A.; Van Eck, J.L.; Siegman, A.E.; "Pulse Compression Inside an Actively AM Mode-Locked Nd:YAG Laser Using a Liquid Kerr Cell"; *IEEE J. Quant. Electr.* 14 (1978) 983