

LASER CONTÍNUO DE Nd:YAG*

*Fernando Antonio Camargo Torre***

RESUMO

O presente trabalho, primeiro de uma serie de quatro, tem como objetivo relatar a construção e caracterização de um laser de Nd:YAG de média potência. O objeto deste será uma introdução, explicando o que é e como funciona um laser, material constituinte e efeitos quânticos desejados, bem como uma caracterização física total de um bastão de Nd:YAG.

ABSTRACT

The purpose of this paper, the first one of a series of four, is to explain the construction and characterization of a medium power laser. Its aim will be an explanatory introduction about what is a laser and how it functions, component material and quantic effects desired as well as a total physical characterization of a rod of Nd:YAG.

1. INTRODUÇÃO

Para a invenção do laser em 1960 muito contribuiu o conceito de emissão estimulada, proposto por Einstein pela primeira vez em 1916. Este conceito é fundamental para a explicação do efeito laser. O grande impacto do laser tanto na indústria como na pesquisa é consequência das propriedades de sua luz: extremamente concentrada e altamente direcional. Com desenhos apropriados, podemos construir lasers com alto grau de monocromaticidade e polarização.

Três condições básicas são necessárias para um laser funcionar. Primeiro deve existir um meio ativo, isto é, uma coleção de átomos, moléculas ou íons que emitam radiação óptica em alguma parte do espectro eletromagnético. Segundo, deve haver uma inversão de população destes átomos, conseguida através do que se chama de bombeio e, finalmente, deve acontecer alguma forma de realimentação óptica para que o sistema possa se manter.

Para o meio ativo, usamos um cristal de Nd:YAG, o qual será explicado a seguir. Para conseguirmos a inversão da população, utilizamos uma lâmpada de Kriptônio, a FK-111C-3 da EG&G, e para obtermos a realimentação óptica, fizemos uso de uma cavidade plano-paralela e uma elíptica banhada a prata, na parte refletiva, para o bombeio.

Devemos lembrar que uma importante aplicação no campo científico é a implementação experimental das interações laser para predições e verificações de diversos processos, em particular os processos ópticos não lineares na faixa do infravermelho. Também devemos considerar o dobramento da frequência através do bombeio de "dye lasers".

* Este trabalho é uma compilação da Tese defendida pelo autor "Construção e Caracterização de um Laser Contínuo de Nd:YAG" na UNICAMP.

** Licenciatura (UNICAMP), Bacharelado (UNICAMP) e Mestrado (UNICAMP) em Física. Professor de Física, Biofísica, Informática em Educação (Graduação), Bioinformática e Bioestatística (Pós-Graduação).

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO LASER DE ND:YAG

O laser de Nd:YAG é um dos mais populares tipos de laser de estado sólido, possuindo uma combinação de qualidades que o tornam extremamente favorável para este tipo de utilização. Possui uma boa qualidade óptica e uma condutividade térmica bastante alta; além disso, a estrutura cúbica do hospedeiro YAG favorece uma linha de fluorescência bastante estreita, o que resulta em um alto ganho e um baixo limiar. No Nd:YAG, o íon trivalente de Nd substitui o ítrio, também trivalente, não requerendo portanto compensação de carga (Figura 2.1).

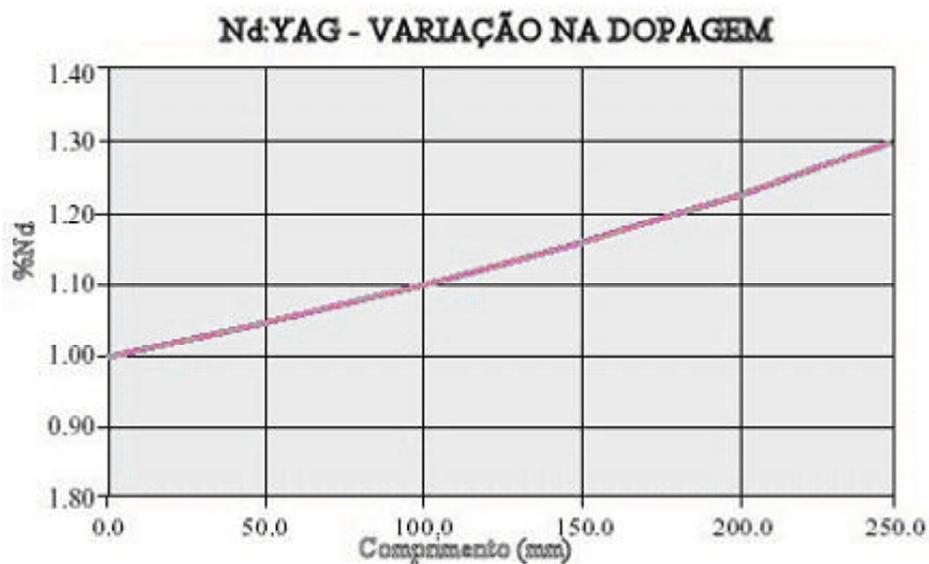


Figura 2.1 – Mostra a variação na dopagem de Nd em YAG. Percebe-se que variando a porcentagem de Nd temos diferentes comprimentos de onda.

Este laser não se transformou em uma ferramenta extensamente aceita até os anos 70. Sistemas baseados no YAG podiam funcionar em altas taxas de repetição, com energias mais elevadas da saída, e operavam mais convenientemente do que os sistemas baseados no Rubi de primeira geração, primeiramente por causa da estabilidade térmica e da natureza robusta do material do Nd:YAG. Após ter ganho a aceitação dentro da comunidade militar, os mercados científicos, industriais e médicos foram explorados.

Nas aplicações onde o modo TEM_{00} é requerido precisa-se reduzir ou eliminar as variações no volume do material e na absorção da radiação de bombeio. Além disto, as distorções da frente de onda devido às imperfeições geométricas e aos efeitos do gradiente térmico, tais como o da lente térmica, devem ser minimizadas. Neste caso, a concentração do neodímio deve variar entre 0.4 a 0.8%.

No modo CW (contínuo), este laser tem aplicações e serve em pesquisas na área biomédica. Tem ainda aplicações em telecomunicações, pesquisa e militar.

3. NOMENCLATURA DOS NÍVEIS DE ENERGIA

A nomenclatura dos níveis de energia pode ser ilustrada discutindo-se o íon Nd^{+3} . Este íon possui três elétrons na subcamada 4f. No estado fundamental suas órbitas são tão alinhadas que o momento angular orbital é acrescido de $3 + 2 + 1 = 6$ unidades atômicas. O momento angular total $L = 6$ é expresso pela letra I.

Os spins destes três elétrons são alinhados paralelamente, proporcionando um acréscimo de $3/2$ unidades no momento angular, o qual, quando somado antiparalelamente ao momento angular orbital, fornece um momento angular total de $6 - 3/2 = 9/2$ unidades.

De acordo com as regras quânticas de adição do momento angular, o vetor soma do momento angular igual a 6 e do momento angular do spin igual a $3/2$ pode resultar em quatro valores para o momento angular total: $9/2$, $11/2$, $13/2$ e $15/2$.

Os níveis correspondentes a estes valores são ${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{13/2}$ e ${}^4I_{15/2}$. O primeiro deles, que possui a menor energia, é o nível básico; os outros estão entre os primeiros níveis excitados do Nd^{+3} . Estes níveis são distinguíveis pela orientação dos spins a respeito do momento angular orbital resultante.

4. PROPRIEDADES FÍSICAS

Além das características do laser e do espectro favorável apresentado pelo Nd:YAG, a rede hospedeira (YAG) é notável por suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

A estrutura YAG é estável desde baixas temperaturas até perto de seu ponto de fusão. O hospedeiro $Y_3Al_5O_{12}$ é um cristal anisotrópico, incolor, com uma estrutura cúbica característica das granadas. No Nd:YAG aproximadamente 1% de Y^{+3} é substituído por Nd^{+3} .

O raio dessas duas terras raras difere em aproximadamente 3%, entretanto, se aumentarmos muito a concentração de neodímio obtemos cristais extremamente tencionados, indicando que ou o limite de solubilidade de neodímio foi excedido ou que a rede YAG foi distorcida. Algumas das propriedades físicas do Nd:YAG estão listadas na tabela 4.1, com parâmetros do laser e ópticos.

Tabela 4.1 – Propriedades Físicas e Ópticas do Nd:YAG

Fórmula Química	$Nd:Y_3Al_2O_{12}$
Peso %Nd	0,725
% Atômica de Nd	1,0
Átomos Nd/cm ³	$1,38 \cdot 10^{20}$
Ponto de fusão	1970°C
Dureza	1215
Densidade	4,56g/cm ³
Stress de ruptura	$1,3 - 2,6 \cdot 10^3$ Kg/cm ²
Módulo de elasticidade	$3 \cdot 10^3$ Km/cm ²
Coeficiente de expansão térmica	
Orientação [100]	$8,2 \cdot 10^{-6} \cdot C^{-1}$ 0 - 250°C
Orientação [110]	$7,7 \cdot 10^{-6} \cdot C^{-1}$ 0 - 250°C
Orientação [111]	$7,8 \cdot 10^{-6} \cdot C^{-1}$ 0 - 250°C
Largura de linha	4,5 Å
Emissão estimulada da seção transversal	$\sigma = 2,7 - 8,8 \cdot 10^{-19}$ cm ²
Tempo de relaxação (⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{5/2})	30ns
Tempo de vida da radiação (⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{13/2})	550 μs
Tempo de vida da fluorescência espontânea	230 μs
Energia do fóton λ	$h\nu = 1,86 \cdot 10^{-19}$ J 1,82 1,06 μm
Índice de refração	(λ)
Perda por difração	$\alpha \approx 0,002$ cm ⁻¹

5. PROPRIEDADES DO LASER

O laser de Nd:YAG é um sistema de quatro níveis, como é mostrado de uma maneira simplificada na figura 5.1. A transição laser tem um comprimento de onda de 1,06 μm originada na componente R₂ do nível ⁴F_{3/2}, e termina em Y₃, componente do nível ⁴I_{11/2}.

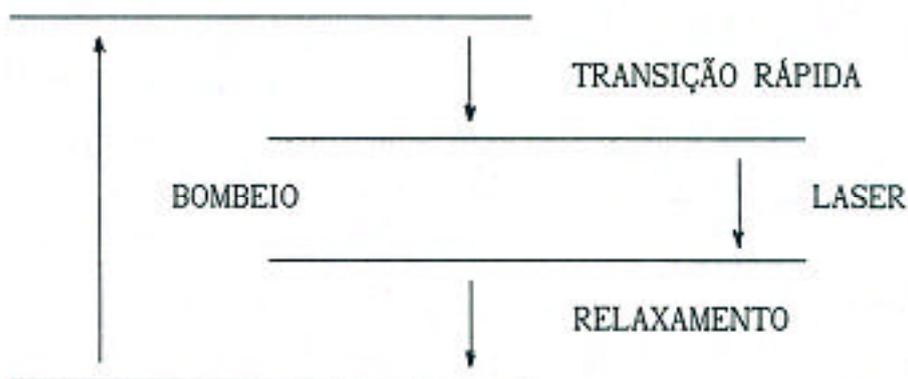


Figura 5.1 – Diagrama esquemático do laser de Nd:YAG, mostrando os quatro níveis de energia, desde o bombeio até o relaxamento.

À temperatura ambiente somente 40% da população do nível ${}^4F_{3/2}$ está em R_2 , os 60% restantes estão no sub-nível R_1 , de acordo com a lei de Boltzmann.

A transição laser ocorre logo que este sub-nível é preenchido por transição térmica (ver fig. 5.2).

O nível fundamental do Nd:YAG é o ${}^4I_{9/2}$. Há um certo número de níveis relativamente ligados, os quais juntos podem ser vistos como o nível 3 de bombeio. O nível terminal é o de 2111 cm^{-1} acima do nível básico e portanto a população é um fator de $\exp(\Delta E/KT) \approx \exp(-10)$ da densidade do nível básico. Como o nível básico não é populado termicamente, a condição de limiar é obtida facilmente.

O nível mais alto ${}^4F_{3/2}$ tem uma eficiência de fluorescência maior que 99,5% e um tempo de vida radioativo de 230 ns . Este nível emite da seguinte maneira:

$${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2} = 0,25, \quad {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2} = 0,60, \quad {}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2} = 0,14 \text{ e}$$

${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2} < 0,01$. Isto significa que quase todos os íons transferidos do nível básico para as bandas de bombeio param antes do nível de laser e que 60% desses íons causam fluorescência em ${}^4I_{11/2}$.

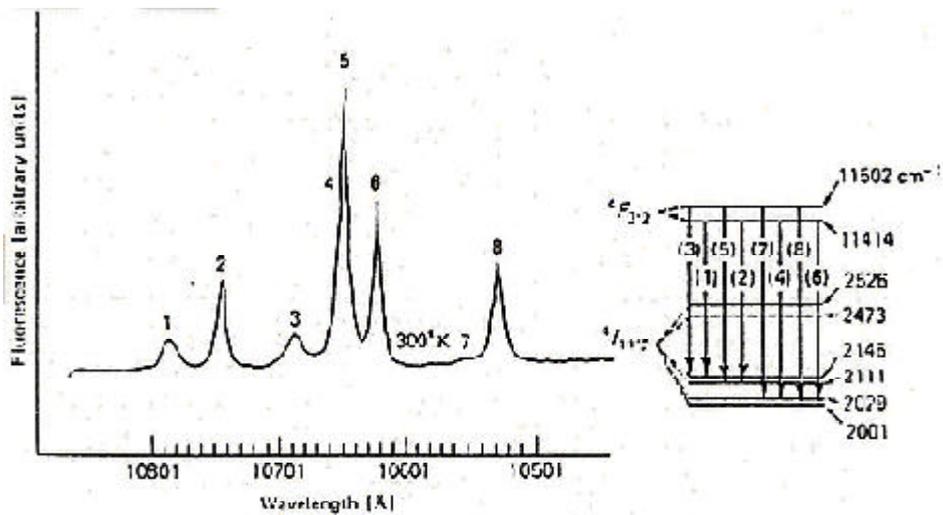


Figura 5.2– Espectro de fluorescência do Nd³⁺ em YAG à 300K na região de 1,06mm

Os valores publicados da emissão estimulada da secção transversal variam de 2,7 - 8,8.10⁻¹⁹cm².

A figura 5.2 mostra o espectro de fluorescência do Nd³⁺ em YAG perto da região da saída do laser com os correspondentes níveis de energia para várias transições. A absorção do Nd:YAG entre 0,3 a 0,9 é mostrada na figura 5.3 e as propriedades térmicas estão resumidas na tabela 1.

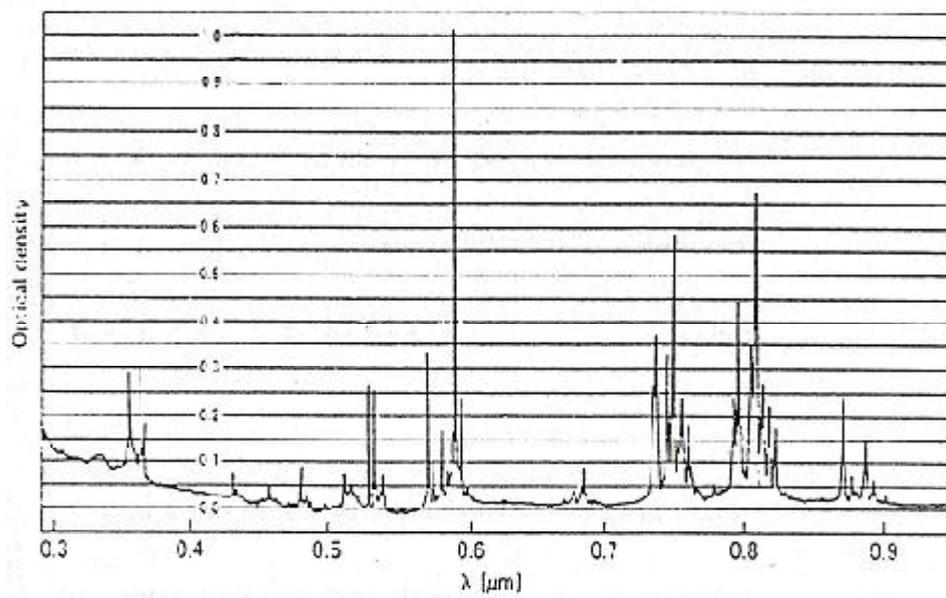


Figura 5.3– Espectro de absorção do Nd:YAG à 300K

Tabela 5 – Propriedades térmicas do Nd:YAG

PROPRIEDADES	UNIDADES	300K	200K	100K
Cond. Térmica	$Wcm^{-1}K^{-1}$	3,130	0,210	0,550
Calor específico	$Wg^{-1}K^{-1}$	3,590	0,430	0,150
Dil. Térmica	$cm^{-1}K^{-1}$	3,016	0,100	0,920
Exp. Térmica	K^{-1}	7,500	5,800	4,250
$\frac{\partial n}{\partial T}$	K^{-1}	$7,3 \cdot 10^{-4}$	–	–

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KONINGSTEIN, J. A.; GEUSIC, J. E. *Phys. Rev.* 136, 711 (1964)
- NEELAND, J. K.; EUTUHOV, V. *Phys. Rev.* 156, 244 (1967)
- KUSHIDA, T.; GEUSIC, J. E. *Phys. Rev. Letters* 21, 1172 (1968)
- KUSHIDA, T.; MARCOS, H. M.; GEUSIC, J. E. *Phys. Rev.* 167, 289 (1968)
- WEBER, M. J.; VARITIMOS, T. E. *J. Appl. Phys.* 42, 4996 (1971)
- ALVES, R. V.; BUCHANAN, R. A.; WICKERSHEIN, K. H.; YATES, E. A. C. *J. Appl. Phys.* 42, 3043 (1971)
- BIRNBAUM, M.; GELBWACHS, J. A. *J. Appl. Phys.* 43,2335 (1972)
- SINGH, S.; SMITH, R. G.; VANUIERT, L. G. *Phys. Rev.* 810, 2566 (1974)
- KOECHNER, W. *Solid State Laser Engineering*, Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin 1976.
- CAIRD, J.; SHINN, M.; KIRCHOFF, T.; SMITH, L.; WILDER, R. "Measurements of Losses and Lasing Efficiency in GSGG:Cr, Nd and YAG:Nd Laser Rods", Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-94624 Preprint, Submitted to Applied Optics, May 20, 1986.
- HAMLIN, S. "Ultra-Lightweight, Multi-wavelength, Flashlamp-Pumped LIDAR Transmitter", IRIS Specialty Group Meeting on Active Systems, (secret) 1991.
- WU, R.; MYERS, M.; MYERS, J.; HAMLIN, S. "560mW, Fifth Harmonic (213nm), 200Hz Flashlamp Pumped Nd:YAG Laser System", OSA Proc. on Advanced Solid State Lasers, (ASSL) 1996.
- MURDOUGH, M.; DENMAN, C. "Mode-Volume and Pump-Power Limitations in Injection-Locked TEM₀₀ Nd:YAG Rod Lasers", Applied Optics, Vol. 35, No. 30, pp. 5925-5936, October 20, 1996.
- NAMMOUR, S.; KOWALYK, K.; VALICI, C.; GUILLAUME, P. "Pulp Temperature Increases After Selective Ablation of Caries by KTP:Nd:YAG Laser", Photonics West/BIOS '97, SPIE Conference on Biomedical Optics, 1997.