

## **CAVIDADES PARA LASER CONTÍNUO DE ND:YAG\***

*Fernando Antonio Camargo Torre\*\**

### **RESUMO**

Este trabalho é o segundo de uma série de quatro e tem como objetivo relatar a construção e caracterização de um laser de Nd:YAG de média potência. O objetivo deste artigo será explicar as diferenças entre cavidade de bombeio e cavidade de ressonância, com uma breve introdução matemática, demonstrando como calcular essas cavidades assim como seu ganho e eficiência.

**Palavras-chave:** cavidade, cavidade de bombeio, cavidade ressonante, laser, Nd:YAG.

### **ABSTRACT**

The purpose of this paper, the second one of a series of four, is to explain the construction and characterization of a medium power laser of Nd:YAG. The objective of this article is to explain the differences between pump cavity and resonance cavity with a brief mathematical introduction demonstrating how to calculate these cavities as well as their profit and efficiency.

**Key words:** cavity, pump cavity, resonance cavity, laser, Nd:YAG.

### **INTRODUÇÃO**

A luz do laser é muito diferente da luz “normal”, pois tem as seguintes propriedades:

- É monocromática. Contém um comprimento de onda específico de luz (uma cor específica). O comprimento de onda da luz é determinado pela quantidade de energia liberada quando o elétron decai a uma órbita mais baixa.
- A luz liberada é coerente, isto é, “organizada”.
- A luz é muito direcional. Uma luz de laser tem um feixe muito estreito e é muito forte e concentrada.

Para fazer estas três propriedades ocorrerem, precisamos ter algo chamado emissão estimulada. Isto não ocorre em uma lâmpada comum, onde todos os átomos liberam seus fótons aleatoriamente. Na emissão estimulada, a emissão do fóton é organizada.

---

\* Este trabalho é uma compilação da tese defendida pelo autor “Construção e Caracterização de um Laser Contínuo de Nd:YAG” na UNICAMP.

\*\*Mestrado (UNICAMP) em Física, Bacharelado (UNICAMP) e Licenciatura (UNICAMP). Professor de Física, Biofísica, Informática em Educação (Graduação), Bioinformática e Bioestatística (Pós-graduação) no UNIANCHIETA.

Email: factorre@terra.com.br

O fóton que todo átomo libera tem um determinado comprimento de onda que é dependente da diferença da energia entre o estado excitado e o estado não excitado. Se este fóton (possuindo uma determinada energia e fase) se encontrar com um outro átomo que tenha um elétron no mesmo estado excitado, a emissão estimulada pode ocorrer. O primeiro fóton pode estimular ou induzir a emissão atômica tal que o fóton emissor subsequente vibra com a mesma frequência e sentido que o fóton “entrante”. Esta emissão estimulada começa a acontecer na “Cavidade de Bombeio”.

A outra condição para a ocorrência da luz estimulada “laser” é um par de espelhos especiais para o comprimento de onda emitido, um em cada extremidade da “Cavidade de Ressonância”, um deles 100% refletivo e o outro com 85% de reflectividade (esta reflectividade pode variar e é por este espelho que ocorre a “saída” da luz laser). Os fótons, com um comprimento de onda e uma fase específicos, refletem nos espelhos, inúmeras vezes, passando pelo meio ativo (discutido no artigo anterior). No processo, estimulam outros elétrons a fazerem o salto energético e podem causar a emissão de mais fótons do mesmo comprimento de onda e fase. Um efeito cascata ocorre, e muito rapidamente teremos muitos fótons do mesmo comprimento de onda e fase se propagando.

### CAVIDADE DE BOMBEIO

#### Eficiência Teórica

A eficiência em transferir a radiação de uma fonte de bombeio para o meio laser determina a eficiência geral do sistema. Existem inúmeras geometrias para bombeamento, tais como: bombeamento lateral, bombeamento axial.

No bombeamento lateral, um bastão cilíndrico é bombeado por uma lâmpada cilíndrica ou helicoidal, cuja luz atinge o meio ativo perpendicularmente ao feixe do laser.

Sem sombra de dúvidas a configuração mais utilizada de bombeamento lateral é a cavidade elíptica, onde o bastão e a lâmpada são colocados respectivamente nos focos da elipse.

Esta configuração é baseada em que os raios originados em um dos focos, obrigatoriamente serão refletidos para o outro foco. Em um cilindro elíptico haverá transferência de energia de uma fonte linear colocada em um dos focos para o meio ativo colocado no outro foco. O cilindro elíptico é fechado por duas laterais plano-paralelas também refletoras, que o torna opticamente infinitamente longo.

A energia total de bombeio que é transferida da lâmpada ao bastão pode ser aproximada para:

$$(1)$$

$$\eta = \eta_{ge} + \eta_{op}$$

com

$\eta_{ge}$  : coeficiente geométrico de transferência

$\eta_{op}$  : eficiência óptica da cavidade

Onde  $\eta_{ge}$  representa a fração calculada de raios deixando a lâmpada e que atinge o bastão tanto diretamente como depois de refletir nas paredes da cavidade e  $\eta_{op}$  inclui todas as perdas da cavidade; este parâmetro pode ser expresso por:

$$\eta_{op} = r_w(1 - r_r)(1 - a)(1 - f) \quad (2)$$

$r_w$  : reflectividade das paredes para a banda de bombeio

$r_r$  : reflexões na superfície do bastão ou das camisas de refrigeração

$a$  : perda por absorção no meio óptico, tal como o líquido de resfriamento

$f$  : proporção da área não refletora da cavidade em relação à área interna, este fator refere-se a aberturas na cavidade para inserirem-se o bastão e a lâmpada

Chamamos a atenção para que o fato de que as equações (1) e (2) são aproximações, levando-se em conta que as radiações da lâmpada atingirão o bastão somente após uma reflexão. Se quisermos levar em conta múltiplas reflexões devemos expressar as equações (1) e (2) em séries.

A cavidade elíptica foi extensivamente discutida na literatura (BOWNESS, 1965). A fonte de bombeio é usualmente tratada como um cilindro irradiador, o que implica que a fonte terá um brilho constante através de seu diâmetro quando vista de qualquer ponto da cavidade.

A luz que chega ao bastão sem refletir na parede elíptica será levada em consideração, mas a luz que retorna à lâmpada, refletida pela parede, será assumida perdida.

A reflexão na parede elíptica é assumida perfeita. Na prática isto não ocorre, pois haverá uma pequena perda em cada reflexão, mas como a maior parte da luz irá até o bastão na primeira reflexão, isto não afetará muito as relações a serem obtidas.

Assumiremos que a cavidade elíptica possui em cada extremidade superfícies perfeitamente polidas perpendiculares ao eixo do cilindro elíptico. Na fig. 1 (KALININ; MARK, 1970), as trajetórias dos fótons são mostradas como originadas de um elemento de volume  $dV$  da fonte. Na fig. 1a, deixam a superfície de fonte normal-

mente e permanecem num plano seccional. A fig. 1b mostra fótons que deixam a fonte em trajetórias que formam ângulos com o plano seccional da elipse. Neste caso, estes fótons podem ser refletidos pelas “tampas” do cilindro elíptico.

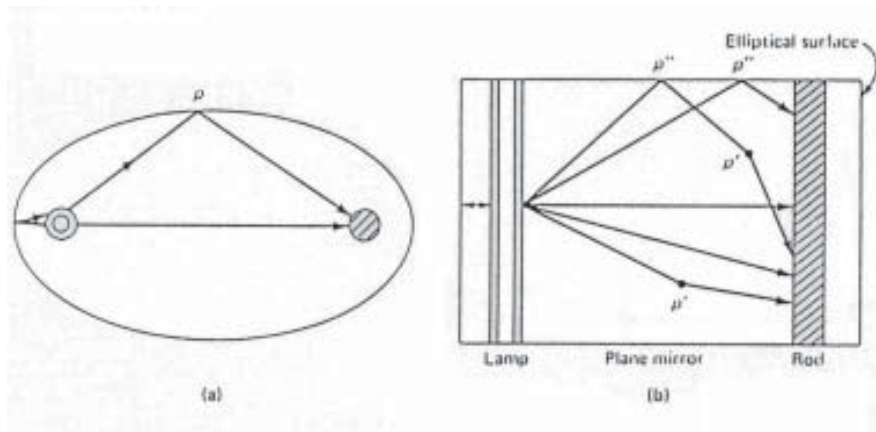


Figura 1- Trajetória dos fótons emitidos pela lâmpada: a) secção transversal; b) vista de topo de uma cavidade elíptica de bombeio.

Nas expressões teóricas obtidas para a eficiência da configuração elíptica, o sistema de bombeio é usualmente caracterizado pelo raio do bastão e pelo raio da lâmpada

$r_r / r_L$ , pelo raio da lâmpada e pelo semi-eixo maior  $r_r / a$  e pela excentricidade

$e = c / a$ , onde  $2c$  é a separação confocal.

Consideremos um ponto qualquer P na superfície da cavidade com uma distância  $l_R$  do cristal e  $l_L$  da lâmpada como mostrado na fig. 2 (KALININ; MARK, 1970).

Suponhamos a lâmpada com um raio  $r_L$ , então, como consequência da conserva-

ção dos ângulos, depois da reflexão a imagem terá um raio  $r_L' = r_L l_r / l_L$ . Isto significa

que a porção do refletor elíptico perto da lâmpada formará uma imagem aumentada do bastão enquanto que a porção perto deste formará uma imagem reduzida da lâmpada.

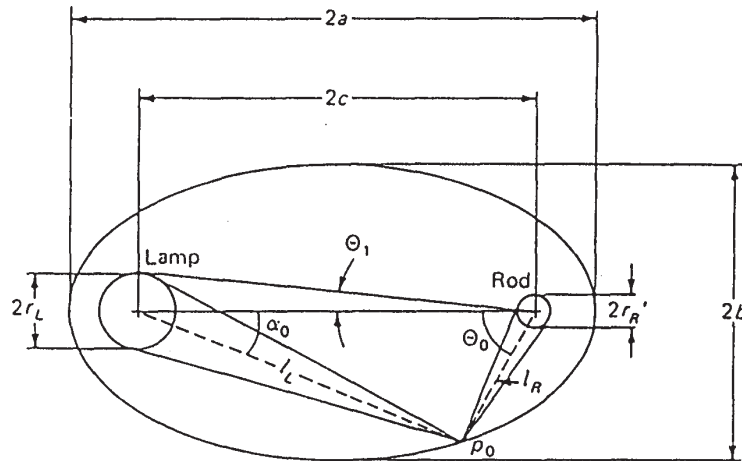


Figura 2 - Seção transversal de uma cavidade elíptica de bombeio. Excentricidade  $e = c/a$ ; distância focal  $c = (a^2 - b^2)^{1/2}$ .

Um ponto  $P_0$ , com ângulos  $\alpha_0$  e  $\theta_0$ , medidos em relação à lâmpada e ao bastão respectivamente, pode ser definido dividindo-se estas duas regiões.

Neste ponto a elipse gera uma imagem da lâmpada que preenche exatamente o diâmetro do bastão. Da propriedade da elipse e notando que em  $P_0 l_r / l_L = r_r / r_L$ , obtemos:

$$\cos \alpha_0 = \frac{1}{e} \left[ 1 - \frac{1 - e^2}{2} \left( 1 + \frac{r_r}{r_L} \right) \right] \quad (3)$$

e

$$\text{sen} \theta_0 = \left( \frac{r_L}{r_r} \right) \text{sen} \alpha_0 \quad (4)$$

O coeficiente geométrico de transferência da cavidade pode ser calculado considerando-se qual fração de energia irradiada pela lâmpada em um ângulo é absorvida pelo bastão.

Integrando-se sobre todos os ângulos chegamos a:

$$\eta_{ge} = \frac{1}{\pi} \left[ \alpha_0 + \left( \frac{r_r}{r_L} \right) \times \theta_0 \right] \quad (5)$$

Esta expressão está plotada na fig. 3 (KOECHNER, 1976). Uma certa porção da superfície refletora atrás da lâmpada é encoberta por esta. Em lâmpadas contínuas, o plasma é relativamente fino e a radiação de bombeio refletida é absorvida por ele. Se nós assumimos que esta radiação refletida de volta à lâmpada é perdida, precisamos reduzir o ângulo  $\theta_0$  por  $\theta_L$ , onde:

$$\text{sen} \theta_L = \frac{r_L}{4ae} \quad (6)$$

e finalmente obtemos o coeficiente de transferência:

$$\eta_{ge}' = \frac{1}{\pi} \left[ \alpha_0 + \left( \frac{r_r}{r_L} \right) (\theta_0 - \theta_1) \right] \quad (7)$$

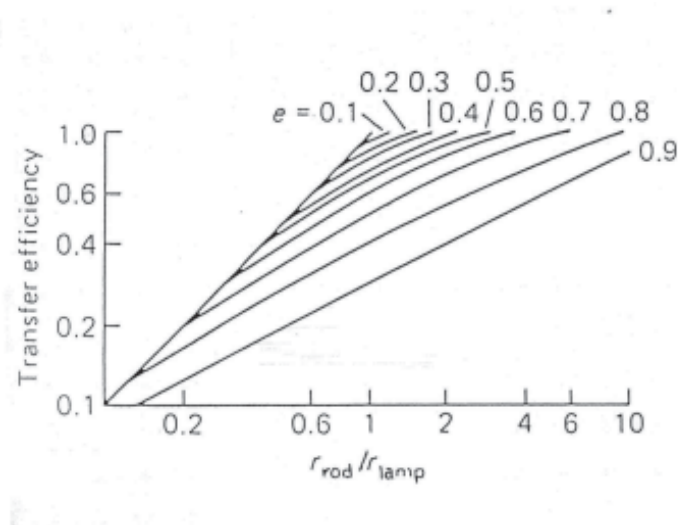


Figura 3 – Dependência da eficiência de transferência num refletor elíptico sobre a quantidade  $\frac{r_r}{r_L}$ .

Percebe-se pelas figuras 3 e 4 (KOECHNER, 1976) que a eficiência aumenta com o aumento da relação  $\frac{r_r}{r_L}$  e com a diminuição da excentricidade “e”.

Isto decorre do fato de que a magnificação da fonte de bombeio aumenta com a excentricidade da elipse. Uma eficiência superior é obtida portanto para um cavidade quase circular.

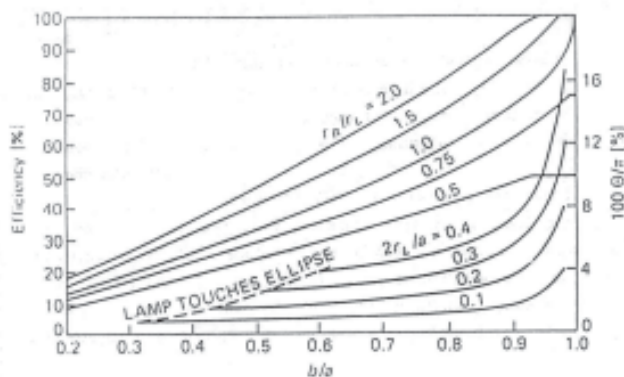


Figura 4- Eficiência de uma cavidade de bombeio elíptica simples. As curvas superiores são para  $\frac{2r}{a} = 0$ , enquanto o inferior fornece a perda devido ao tamanho finito da lâmpada. Multiplica-se a perda por  $\frac{r_r}{r_L}$  e subtrai-se da eficiência fornecida pela curva superior. A escala à esquerda é para o conjunto superior somente e a da direita para o inferior.

### CAVIDADE DESENVOLVIDA

No desenvolvimento da cavidade dois parâmetros foram considerados: eficiên-

cia de bombeio e fácil manutenção.

A refrigeração da cavidade requer muito cuidado. A potência elétrica máxima que a lâmpada consegue agüentar é de 6KW, isto em uma área muito pequena, fornecendo portanto uma alta densidade de energia.

Decidiu-se então pelo desenho de uma cavidade onde tanto o bastão quanto a lâmpada estão envoltos por tubos de vidros (camisas) por onde a água de refrigeração passa, mantendo com isto o interior da cavidade totalmente seco, prolongando desta forma a vida útil da camada refletora.

Não somente a lâmpada e o bastão necessitam de refrigeração, também a superfície elíptica deve ser refrigerada, pois como ela não é 100% refletora para todos os comprimentos de onda emitidos pela lâmpada, há um grande aquecimento de suas paredes por absorção de energia, este calor tendo de ser obrigatoriamente drenado, com perigo de perda de toda a cavidade.

Mostramos na fig. 5 a cavidade que desenvolvemos. Pode-se notar a cavidade refletora elíptica, composta por dois semicilindros elípticos simétricos, tendo cada um entrada e saída da água de refrigeração. As duas laterais do cilindro elíptico, perpendiculares ao seu eixo, também são simétricas, possuindo dois orifícios para a lâmpada e bastão, que são posicionados nos focos da elipse.

A água de refrigeração da lâmpada entra e sai axialmente pela extremidade desta e a do bastão, pelos dois tubos perpendiculares ao eixo deste (ver fig. 5).

O material utilizado para o corpo cilíndrico foi uma bucha de bronze, torneada nas dimensões requeridas e as superfícies planas são de latão, tendo sido depois de prontas, totalmente niqueladas, recebendo posteriormente um banho de prata eletrolítica. Conforme podemos observar na fig.5, para o comprimento de onda de absorção do Nd:YAG, que fica próximo de  $800\mu m$ , a prata seria o material mais indicado, tendo sido escolhido principalmente por ter a cavidade seu interior totalmente seco, ao contrário de outras cavidades usuais que são imersas em água, que rapidamente oxidaria esta camada.

As dimensões desta cavidade, que chamaremos de  $\Phi$ , são as seguintes:

Comprimento :  $L = 76,66mm$

Eixo maior :

Eixo menor :

$\Phi = 76,66m$



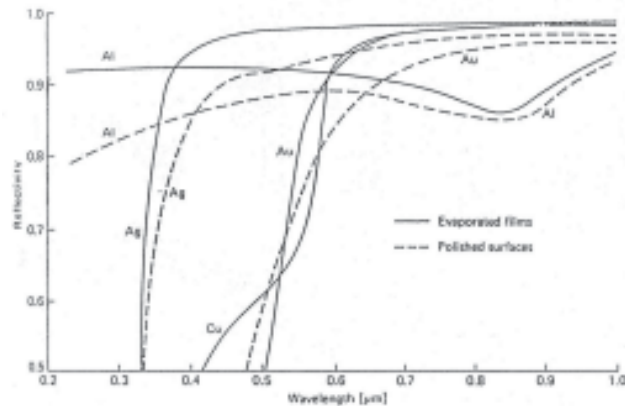


Figura 5 – Reflectividade versus comprimento de onda para os metais mais comumente utilizados no revestimento de cavidades de bombeio.

Também utilizamos uma cavidade comercial , recoberta por um banho de ouro, inserida em corpo de acrílico, com as seguintes dimensões:

$$\phi_2 = 38,00mm$$

Comprimento :  $L = 76,66mm$

Eixo maior :

Eixo menor :

### CAVIDADE RESSONANTE

Alinhamento da Cavidade

Tanto a cavidade como  $C_2$  são plano-paralelas. A cavidade  $C_1$  foi montada sobre uma base de alumínio de 3cm de espessura, com os espelhos fixados em placas também de alumínio com a mesma espessura e fixados nas extremidades desta base, distanciados de 57,62cm. Sobre esta base vai uma tampa em “U” de galvanizado, formando o conjunto uma caixa bastante compacta e de fácil manuseio sobre a bancada óptica onde está localizada.

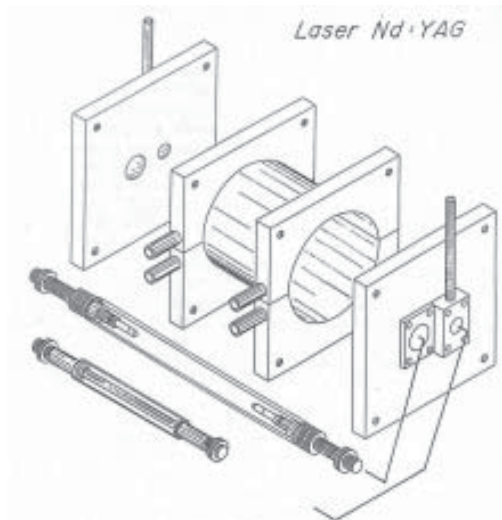


Figura 6 – Desenho da cavidade elíptica de bombeio desenvolvida. Observam-se as duas camisas contendo respectivamente o bastão e a lâmpada.

A cavidade  $C_2$  está localizada sobre um trilho e possui o mesmo distanciamento dos espelhos que  $C_1$ , ficando este trilho fixo sobre a bancada. O espelho de ressonância possui uma reflectividade de 100% (R1) e o de saída 90%. (R2). Podemos observar o desenho esquemático da cavidade com os espelhos e bastão de Nd:YAG na fig. 7.



Figura 7 – Desenho esquemático das duas cavidades plano-paralelas utilizadas.

Para o alinhamento das duas cavidades utilizamos o mesmo método, esquematizado na fig. 8, e que consiste no seguinte: alinhamos o feixe do laser de He-Ne paralelo à bancada e o fazemos incidir nos espelhos auxiliares Esp. 1 e Esp. 2. Através do correto ajuste destes espelhos, fazemos com que o feixe incida perpendicularmente à face do bastão, passando pelo seu eixo. Isto é feito utilizando-se dois “pin-holes” colocados na cavidade de bombeio, junto ao bastão, mantendo-os fixos durante todo o processo. O Esp. 1 é responsável pelo feixe incidente na face 1 do bastão e o Esp. 2 pelo que sai da face 2 do mesmo. Através de ajustes cuidadosos, ora em Esp. 1 ora em Esp. 2, vai se fazendo com que o feixe passe pelos dois “pin-holes” ao mesmo tempo. Quando se consegue o máximo de intensidade do feixe na face 2 do bastão, a cavidade estará devidamente alinhada.

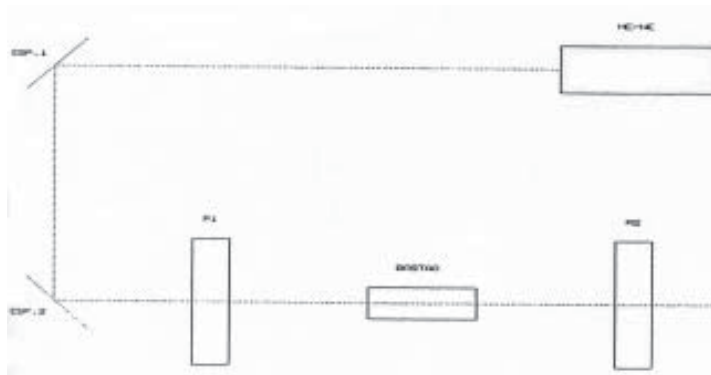


Figura 8 – Esquema do sistema de alinhamento das duas cavidades.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SCHULDT, S. B.; AAGARD, R. L.: Appl. Opt., 1963. 2, 509.

EUTUHOV, V.; NEELAND, J. K.: Appl. Opt 6, 1967. 6, 437.

EDWARDS, J. G.: Appl. Opt. 1967. 6, 837.

FEKETE, D.: Appl. Opt., 1966. 5, 643.

BOWNESS, C.: Appl. Opt., 1965. 4, 103.

DEVLIN, G. E., MACKENNA, J., MAY, A. D. e SCHAWLOW, A. L.: Appl. Opt. 1, 1962. 1, 11.

MACKENNA, J.: *Appl. Opt.*, 1963. 2, 303.

KALININ, Yu. A.; MARK, A. A. *Opt. Tech.*, 1970. 3, 129.

KOECHNER, Walter. *Solid State Engineering*. Springer Verlag New York/Berlin, 1976.