

双棒串接 Nd:YAG 激光器的稳定特性研究

王海林, 周卓尤, 曹红兵, 黄维玲

(华中科技大学激光研究院, 武汉 430074)

摘要:采用激光谐振腔的矩阵理论对双棒串接的 Nd:YAG 激光器的稳定特性进行了分析, 给出了对称放置的平行平面腔稳区范围。计算结果表明, 合理选择棒的位置及工作参数, 可以提高激光器的输出功率。根据理论分析的结果, 设计了双棒串接激光器, 获得了 840 W 的输出功率。

关键词:双棒串接; YAG 激光器; 稳定区

中图分类号: TN248.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2003)02-0149-04

Study on the Stable Characteristic of Two-rod Nd:YAG Laser

WANG Hai-lin, ZHOU Zhuo-you, CAO Hong-bing, HUANG Wei-ling

(Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: By using the matrix theory of resonator, the stability characteristic of a two-rods Nd:YAG laser system was analyzed. The stable range of a symmetric plane-plane resonator was calculated, and the result shows that the output power can be increased by a suitable choice of rods position. The maximum output power of 840 W was attained in our experiments.

Key words: two-rods system; YAG laser; stable range

1 引言

目前, 采用多棒串接是提高 Nd:YAG 激光器输出功率的主要方法。在 Nd:YAG 激光器工作过程中, YAG 棒在泵浦功率的作用下会产生热透镜效应, 热透镜焦距随着泵浦功率的变化而改变^[1], 从而使谐振腔参数改变, 导致激光输出功率不稳定。本文运用谐振腔矩阵理论, 详细分析了双棒串接的平行平面腔的动态工作特性, 计算了双棒对称放置的平行平面腔的稳区范围。另外, 还分析了 2 根棒的热焦距不等对激光器输出稳定性的影响。

2 理论分析

Nd:YAG 棒的热透镜效应可等效为热焦距为 f 的厚透镜, f 与泵浦功率成反比。图 1 为 2 根 Nd:YAG 棒串接的球面谐振腔的结构示意图。M₁、M₂ 为谐振腔 2 反射镜面, 其曲率半径分别为 R_1 、 R_2 ; YAG 棒的长度为 l ; H₁、H₂ 为厚透镜的 2 个主面, 其到棒端面的距离为 h , 由厚透镜主面公式可知, $h = 1/2n$ ^[2]; n 为棒的折射率; d_1 、 d_2 分别为厚透镜主面到谐振腔 2 反射镜面的距离, d_m 为 2 根 YAG 棒主面之间的距离。假设所用的 2 根 Nd:YAG 棒的热焦距相等, $f_1 = f_2 = f$, 从 M₁ 到 M₂ 腔内介质的单程传输矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{d_2}{f} + (1 - \frac{d_2}{f})(1 - \frac{d_m}{f}) & d_1(1 - \frac{d_2}{f}) + d_2(1 - \frac{d_1}{f}) + d_m(1 - \frac{d_1}{f})(1 - \frac{d_2}{f}) \\ -(\frac{2}{f} - \frac{d_m}{f^2}) & -\frac{d_1}{f} + (1 - \frac{d_1}{f})(1 - \frac{d_m}{f}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

则球面谐振腔的 G 参数为^[3]

$$\begin{aligned} G_1 &= a - \frac{b}{R_1} \\ G_2 &= d - \frac{b}{R_2} \end{aligned} \tag{2}$$

对于平行平面腔, $R_1=R_2=\infty$, G 参数可简化为

$$\begin{aligned} G_1 &= a = -\frac{d_2}{f} + (1 - \frac{d_2}{f})(1 - \frac{d_m}{f}) \\ G_2 &= d = -\frac{d_1}{f} + (1 - \frac{d_1}{f})(1 - \frac{d_m}{f}) \end{aligned} \tag{3}$$

可以看出,在激光器工作过程中,当 f 变化时,会引起 G_1 、 G_2 值改变。因此,谐振腔的工作点在 G 参数图上不是固定点,而是以 $(G_1=1, G_2=1)$ 为起点(当泵浦功率为 0 或很小时, $f=\infty$) 的动态曲线。

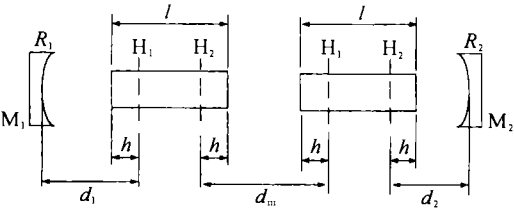


图 1 双棒串接的谐振腔结构图
Fig. 1 Resonator with two-rods inside

以 d_1 为参考值,令 $d_2=k_1d_1$ 、 $d_m=k_2d_1$,代入式(3)可得:

$$\begin{aligned} G_1 &= k_1k_2(\frac{d_1}{f} - \frac{2k_1+k_2}{2k_1k_2})^2 - \frac{4k_1^2+k_2^2}{4k_1k_2} \\ G_2 &= k_2(\frac{d_1}{f} - \frac{2+k_2}{2k_2})^2 - \frac{4+k_2^2}{4k_2} \end{aligned} \tag{4}$$

根据式(3)和式(4),当采用非对称谐振腔结构时,亦即 $d_1 \neq d_2$ 或 $k_1 \neq 1$, G_1 与 G_2 不相等。图 2 给出 2 个非对称谐振腔的 G 参数动态工作曲线 a、b。从图

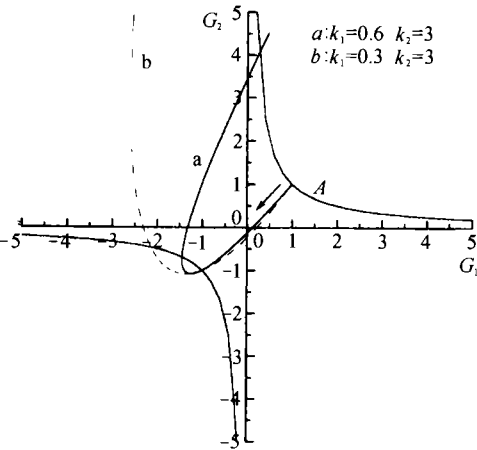


图 2 非对称谐振腔的动态工作曲线
Fig. 2 G-diagram of asymmetric resonator

可看出,当 $k_1 \neq 1$ 时,随着泵浦功率的增加, f 不断减小,谐振腔工作点在 G 参数图上的动态工作曲线是以点 $A(1,1)$ 为起点的抛物线。抛物线与坐标轴 ($G_1=0$ 、 $G_2=0$) 及双曲线 $G_1G_2=1$ 的交点决定了双棒串接的平行平面腔的临界点 G 参数的临界热焦距 f 的值,同时也决定了谐振腔的稳区和非稳区范围。由于谐振腔工作点经过几段稳区和非稳区(如曲线 a 经过 4 段稳区和 4 段非稳区),当谐振腔运行在稳区时,输出功率随泵浦功率的增加而增加;当谐振腔运行在非稳区时,增加泵浦功率会导致输出功率下降,严重时输出功率甚至下降为 0。由于输出功率随泵浦功率的增加出现起伏,因此限制了输出功率的提高。

当采用对称谐振腔结构,亦即 $d_1=d_2$ 或 $k_1=1$ 时,由式(4)可得:

$$G_1=G_2=k_2(\frac{d_1}{f} - \frac{2+k_2}{2k_2})^2 - \frac{4+k_2^2}{4k_2} \tag{5}$$

谐振腔工作点的动态工作曲线是直线,如图 3 所示。其与双曲线 $G_1G_2=1$ 的交点决定了谐振腔稳区和非稳区范围。随着泵浦功率的增加,谐振腔工作点以 $A(1,1)$ 为起点,依次经过原点 $O(0,0)$ 、 $B(-1,-1)$ 、到达 C 点后折返,再依次经过 B 、 O 、 A 和 D 。其中, AB 、 BA 段为稳定区; $B \rightarrow C \rightarrow B$ 和 AD 段为非稳区。即存在 2 段稳区和 2 段非稳区。由式(5)可求出 A 、 O 、 B 和 C 的 f 值,即:

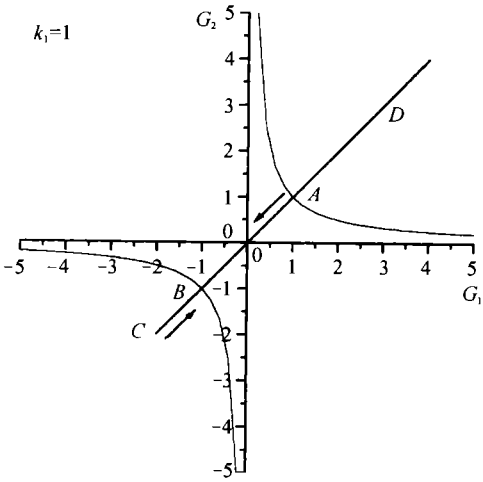


图 3 对称谐振腔的动态工作曲线
Fig. 3 G-diagram of symmetric resonator

$$\begin{aligned} A : G_1=G_2=1 &\rightarrow f=\infty, f=\frac{k_2}{2+k_2}d_1 \\ O : G_1=G_2=0 &\rightarrow f=\frac{2k_2}{(2+k_2)\pm\sqrt{4+k_2^2}}d_1 \\ B : G_1=G_2=-1 &\rightarrow f=d_1, f=\frac{k_2}{2}d_1 \end{aligned} \tag{6}$$

$$C: G_1 = G_2 = -\frac{4 + k_2^2}{4k_2} \rightarrow f = \frac{2k_2}{2 + k_2} d_1$$

把 k_2 的值代入式(6),即可求出稳区和非稳区范围。表 1 给出了部分计算结果。

表 1 对称谐振腔的临界热焦距 f 值和稳区范围

Tab. 1 The critical thermal focus length f and the stable range of a symmetrical resonator

k_2	A	O	B	C	Stable region
f					
1	∞ $0.33d_1$	$2.60d_1$ $0.38d_1$	d_1 $0.50d_1$	$0.67d_1$	$\infty \rightarrow d_1$ $0.50d_1 \rightarrow 0.33d_1$
2	∞ $0.50d_1$	$3.40d_1$ $0.58d_1$	d_1	d_1	$\infty \rightarrow 0.50d_1$
3	∞ $0.60d_1$	$4.30d_1$ $0.69d_1$	$1.50d_1$ $1.00d_1$	$1.20d_1$	$\infty \rightarrow 1.50d_1$ $d_1 \rightarrow 0.60d_1$

由式(6),C 点 G 参数值与 k_2 有关,即

$$G_c = G_1 = G_2 = -\frac{4 + k_2^2}{4k_2} = -\left[\frac{(k_2 - 2)^2}{4k_2} - 1\right] \leq -1 \quad (7)$$

当 $k_2 = 2$ 时,即 $d_m = 2d_1$ 、 $G_{c,max} = -1$,此时临界热焦距值为

$$f = \frac{2k_2}{2 + k_2} d_1 = d_1$$

即在 $k_2 = 2$ 时,C 点与 B 点重合,即工作点在 B 点处折返,计算结果见表 1。这表明,当 f 从 $\infty \rightarrow 0.50d_1$,谐振腔除通过临界点 $B(-1, -1)$ 外,始终工作在稳区;只有当 $f < 0.50d_1$ 时,谐振腔才处于非稳区。因而,在较宽的泵浦功率范围内激光器都能稳定工作,输出功率随着泵浦功率的增加而稳定增加,有利于最大输出功率的获得。

在 $k_1 = 1$ 、 $k_2 = 2$ 时,若所选用的 2 根 Nd:YAG 棒的热效应不一致,在相同泵浦功率时 f 不相等。设 $f_2 = kf_1$ ($k \neq 1$),则可求出 G 参数为

$$\begin{aligned} G_1 &= 2k \frac{d_1^2}{f_1^2} - (3 + k) \frac{d_1}{f_1} + 1 \\ G_2 &= 2k \frac{d_1^2}{f_1^2} - (1 + 3k) \frac{d_1}{f_1} + 1 \end{aligned} \quad (8)$$

谐振腔的动态工作曲线如图 4 所示,为抛物线,且经过 4 段稳定区和 4 段非稳区,这导致谐振腔的稳区范围变窄。因此,应尽量选用热效应相同的 Nd:YAG 棒,或对 2 根棒的泵浦功率进行调整,使 2 根棒的 f 相同。

3 实验结果

实验中,聚光腔为陶瓷反射体,Nd:YAG 棒的尺寸 $\phi 8 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$,谐振腔为平行平面腔,输出镜透

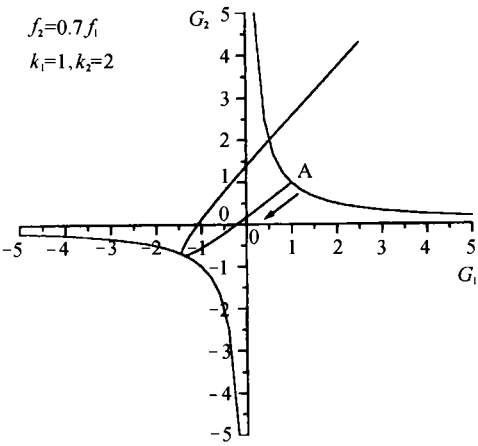


图 4 热焦距不相等时的谐振腔的动态工作曲线

Fig. 4 G -diagram of two-rods laser system with different thermal effect

过率 50 %。测量结果表明,所使用的两根棒的热特性基本一致,可以近似认为在相同泵浦功率下两棒的 f 相等,所以不需要对两棒的泵浦功率进行调整。在最大泵浦功率 11 kW 时,Nd:YAG 棒的 $f = 180 \text{ mm}$, $d_1 = d_2 = 160 \text{ mm}$, $d_m = 320 \text{ mm}$ 。图 5 给出双棒串接连续泵浦的 Nd:YAG 激光器的输出功率曲线。由于在整个泵浦功率范围内 f 始终大于 $0.5 d_1$,激光器一直运行在稳定区内;随着泵浦功率的增加,激光输出功率稳定增加;在单棒泵浦功率为 11 kW 时,得到最大输出功率 840 W。

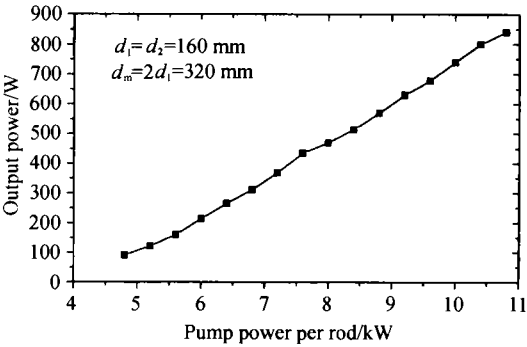


图 5 双棒串接的输出功率曲线

Fig. 5 Output power of the two-rods laser system

4 结 论

非对称结构的双棒串接平行平面腔,随着泵浦功率的增加,谐振腔的动态工作点经过几个稳区和非稳区,激光器只能在较窄的泵浦功率范围内稳定工作,

限制了输出功率的提高,实际应用意义不大。而采用对称结构的谐振腔,且 2 棒主面之间距离 d_m 为棒主面到谐振腔镜面距离 d_1 的 2 倍时,谐振腔在较宽的泵浦功率范围内工作在稳定区内,在热焦距 f 从 $\infty \rightarrow 0.5 d_1$ 范围内,激光器工作稳定,输出功率随着泵浦功率的增加而稳定增加,有利于获得最大输出功率。所以在设计谐振腔时,应根据热效应的大小合理选择 d_1 的值,使 Nd:YAG 棒的 f 在整个泵浦功率范围内大于 $0.5 d_1$ 。另外,如果串接双棒的热效应不一致时,会缩小激光器的稳区范围,因此应尽量选用热效应相同的 Nd:YAG 棒;或对两棒的泵浦功率进行调整,使两棒的 f 相同。

参 考 文 献:

- [1] 李适民. 激光器件原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社,1998.175-186.
- [2] R Ifflander. Solid-State Lasers for Materials Processing [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. 60-62.
- [3] 吕百达. 激光光学[M]. 成都:四川大学出版社,1992. 234-238.

作者简介:

王海林 (1971-),男,在读博士生,主要从事固体激光器件及其应用的研究。