

四棒串接连续灯泵浦 Nd:YAG 大功率激光器*

房明星, 李 强, 姜梦华, 左铁钊

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘 要: 报道了一种符合工业应用的四棒谐振腔连续 Nd:YAG 激光器。实验中采用对称放置方式四棒串接谐振腔得到 2 105 W 的平均功率输出,光束参数积 24 mm · mrad,系统总光电转换效率达到 3.5 %。还对影响激光器工作的因素进行了理论分析。

关键词: Nd:YAG 激光器; 四棒串接谐振腔; 热焦距; 光束质量

中图分类号: TN248: O43

文献标识码: A

在工业应用领域中,可以耦合到光纤、具有良好光束质量的千瓦级固体激光系统受到了越来越多的应用。高功率固体 Nd:YAG 激光器应用于材料加工领域有几个条件^[1]:(1)激光器要求高效率和高功率输出;(2)激光光束有高的光束质量,这样可以用光纤(通常用 $\phi 600\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤)传输;(3)激光器有较宽的工作范围;(4)激光系统能长时间稳定工作。

常规单棒 Nd:YAG 激光器的输出功率被局限在 400~600 W。通过多棒系统可以使输出功率得到进一步提高。一腔多棒的结构是实现高功率、高光束质量激光输出的一种最理想的方法^[2]。采用这种方法得到的激光输出功率可以随着腔内棒数的增加而增长。多棒谐振腔系统中,热焦距的匹配是很重要的。我们对影响多棒高功率固体 Nd:YAG 激光器工作的因素进行了理论和实验上的研究。

1 四棒串接等价谐振腔

四棒谐振腔结构采用对称平平腔结构如图 1, 谐振腔内对称放置四根 Nd:YAG 晶体棒。在多棒大功率固体激光器谐振腔设计中一般采用对称平平腔结构, 这种对称结构使得激光器的稳定工作区域大于非对称结构, 有利于大功率激光器有较宽的稳定工作范围并获得高功率输出。假设相同条件下四根 Nd:YAG 晶体棒具有相同的特性。由于热效应, 每根 Nd:YAG 晶体棒可以等效地看作焦距为 f 的透镜, 焦距 f 与泵浦功率成反比。主面位于距晶体棒端面 $h = 2l/n^{[3]}$ 处, 其中 l 是晶体棒的几何长度, n 是晶体棒的轴向折射率。令两个相邻晶体棒间的光学长度为 d_m , 谐振腔镜与相邻的晶体棒间的距离为 d 。谐振腔内的每个光学元件用 $ABCD$ 光线传输矩阵来描述。把各个元件的描述矩阵按照光线传输的方向顺序依次相乘得到谐振腔输出总的传输矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于球面谐振腔的 q 参数为

$$q_1 = A - B/\rho, \quad q_2 = D - B/\rho \quad (2)$$

因为是平平腔 $\rho_2 = \rho_2 = \infty$, 所以

$$q_1 = A, \quad q_2 = D \quad (3)$$

当 $d_m = 2d$ 时

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{8d^4 - 32d^3f + 40f^2f^2 - 16df^3 + f^4}{f^4} & \frac{4d(2d^4 - 10d^3f + 17d^2f^2 - 11df^3 + 2f^4)}{f^4} \\ -\frac{4(-2d^3 + 6d^2f - 5df^2 + f^3)}{f^4} & \frac{8d^4 - 32d^3f + 40d^2f^2 - 16df^3 + f^4}{f^4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

得到四棒谐振腔的等效 q 参数为

$$q_1 = q_2 = (8d^4 - 32d^3f + 40d^2f^2 - 16df^3 + f^4)/f^4 \quad (5)$$

* 收稿日期:2005-04-04; 修订日期:2005-06-24

基金项目:北京市重点技术创新项目(jc1z2001-1019)资助课题:国家自然科学基金项目(10276003)资助课题

作者简介:房明星(1980—),男,硕士研究生,从事高功率固体激光器的研究。

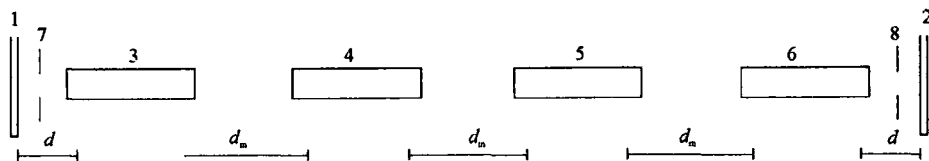


Fig. 1 Principal set-up of the four rods resonator. 1,2:cavity mirror;3,4,5,6:laser rod;7,8:diaphragm

图 1 四棒谐振腔结构示意图。1,2:腔镜;3,4,5,6:激光晶体;7,8:光阑

由式(5)可以看出,随着 Nd:YAG 晶体棒的热焦距的变化, g_1 和 g_2 值会发生相应的变化,谐振腔的工作点在 g 参数图上是一条动态直线,如图 2 所示。图中为四棒对称谐振腔的 g 参数动态工作曲线,两坐标轴 ($g_1 = 0, g_2 = 0$) 和双曲线 $g_2 g_1 = 1$ 决定了谐振腔的稳定区和非稳定区的范围。因为是对称谐振腔且 $d_m = 2d$, 所以动态工作点由点 A(1, 1) 开始沿直线过原点 B(0, 0) 到达点 C(-1, -1), 再经原路返回至点 A(-1, -1)。此后动态工作点由原路线再次移动返回至点 A(-1, -1) 并进入非稳定区。在动态曲线移动过程中,经过几个位于 $g_1 = 0, g_2 = 0$ 和 $g_2 g_1 = \pm 1$ 的临界点。在 $g_1 g_2 = \pm 1$ 处有 5 个临界点

$$f = \infty, \quad f = 3.41d, \quad f = d, \quad f = 0.59d, \quad f = 0.5d \quad (6)$$

在 $g_1 = 0, g_2 = 0$ 处有 4 个临界点

$$f = 13.14d, \quad f = 1.62d, \quad f = 0.72d, \quad f = 0.52d \quad (7)$$

由此可知,在 $f > 0.50d$ 的情况下,四棒谐振腔除了几个临界点外将一直工作在稳定区内。这有利于激光器在较宽的工作范围内获得高功率输出。

2 热焦距匹配和输出功率范围对激光器工作的影响

工业用大功率连续 YAG 激光器通常都要有较宽的功率输出范围。随着泵浦功率的增长,需要经过几个临界点,这就要求四根晶体棒热焦距之间能很好的匹配,否则激光器在临界点附近将工作在非稳区,如图 3 和图 4 所示,这时激光输出功率将会下降,严重时功率输出为 0。图 3 为热焦距不匹配四棒对称谐振腔的 g 参数动态工作曲线,其中四根晶体棒的热焦距分别为 $f, 0.9f, f, f$; 图 4 为热焦距不匹配四棒对称谐振腔的 g 参数动态工作曲线,其中四根晶体棒的热焦距分别为 $f, 0.9f, 1.1f, 1.05f$ 。对这两幅 g 参数动态工作曲线图进行比较可以看出,四棒热焦距全不匹配谐振腔的稳区范围要小于只有一根晶体棒热焦距不匹配谐振腔的稳区范围。若四根晶体棒的热焦距同为 f , 棒间距离都为 d_m , 且两边晶体棒距两个腔镜的距离都是 d , 则谐振腔内各

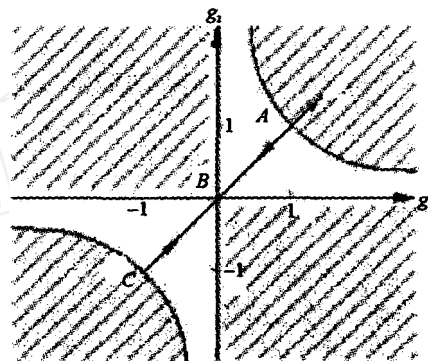


Fig. 2 Stability diagram of an optical resonator, shaded areas indicate regions of unstable operation

图 2 谐振腔的稳区图。阴影部分表示非稳区

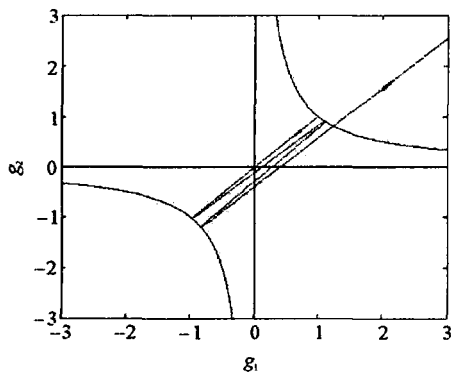
Fig. 3 Stability diagram of a four-rod resonator. Thermal focal length of each rod is $f, 0.9f, f, f$, respectively

图 3 四棒谐振腔稳区图。

四根晶体棒热焦距分别为 $f, 0.9f, f, f$

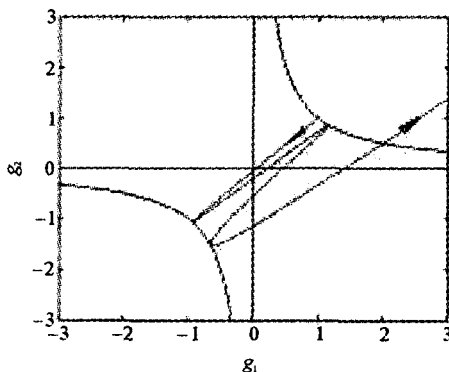
Fig. 4 Stability diagram of a four-rod resonator. Thermal focal length of each rod is $f, 0.9f, 1.1f, 1.05f$, respectively

图 4 四棒谐振腔稳区图。

四根晶体棒热焦距分别为 $f, 0.9f, 1.1f, 1.05f$

个晶体棒的热焦距可以很好地匹配。实际上,临界稳定点并不仅仅是一个点。我们知道热焦距可表示为^[4]

$$f_i = \frac{AK}{p_{in} n_0} \left[\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dt} + n_0^2 \beta_{Cr, \theta} + \frac{n_0 \beta (n_0 - 1)^{-1}}{n_0 l} \right]^{-1} \quad (8)$$

这里有两个热焦距 f_r 和 f_θ , 分别是径向和切向热焦距。对于 Nd: YAG 晶体, 一般 $f_r/f_\theta = 1.2 \sim 1.5$ 。式(5)中的热焦距 f 是平均热焦距。理想情况下, 谐振腔内四根晶体棒的热焦距应该在径向和切向上相互匹配。然而, 高功率激光晶体的热焦距是由很多因素决定的, 如晶体掺杂均匀性和泵浦均匀性等。实验中我们用临界稳定点法^[5]来测量激光晶体棒的径向、切向及平均热焦距。一根晶体棒的平均热焦距、径向和切向热焦距如图 5 所示。

对于某一个激光器, 输出功率范围和光束质量是成反比的^[6]

$$\frac{\Delta P_{out, max}}{(\theta_m w_m)_{max}} = \frac{2\pi\eta}{a} \quad (9)$$

式中: η 是激光器效率; $a = \frac{1}{K} \left[\frac{dn}{dt} + \frac{1}{2} n_0^3 \beta (C_r + C_\theta) + \frac{2n_0 n_0 \beta (n_0 - 1)}{l} \right]$; $\Delta P_{out, max}$ 是最大输出功率变化范围; θ_m 是最大发散角; w_m 是对应束腰半径。

我们可以通过限定激光器工作范围的方法来达到获得高功率、高光束质量的激光输出。实际测量中, 热焦距随泵浦功率的变化近似一条抛物线, 见图 5。在高功率泵浦阶段, 热焦距变化十分缓慢。我们可以充分利用这一点来设计晶体棒间的距离。例如, 根据晶体棒热焦距的情况适当改变晶体棒间距离, 使激光器一直工作在 $f > 0.50d$ 情况下, 则除个别临界稳定点外, 激光器都工作在稳定区。这有利于激光器稳定工作获得高功率输出。又因为采用了对称平平腔, 所以四根晶体棒对称放置在谐振腔内时产生的激光光束束腰总是在耦合输出镜处, 此时四根晶体棒谐振腔输出激光的光束质量就等同于单棒平平谐振腔输出激光的光束质量。

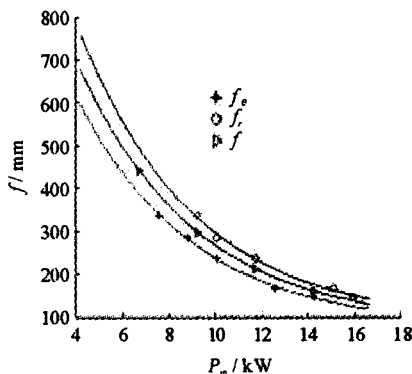


Fig. 5 Measured thermal focal length of YAG crystal rod as a function of lamp input power. Each point represents the calculated effective focal length of YAG crystal for f_r (ooo), f_θ (***), and average f ($\Delta\Delta\Delta$), respectively

图 5 热焦距随泵浦功率的变化曲线

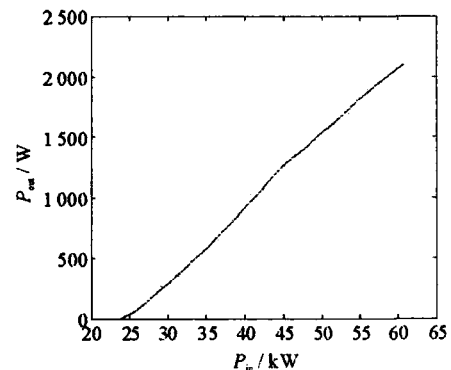


Fig. 6 Experimentally measured four rods laser output power versus electrical input power

图 6 激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线

综上所述, 激光输出功率、输出功率范围和光束质量与谐振腔结构、参数及晶体棒间的热焦距匹配有关。当然也与单棒激光输出特性有着紧密的联系。以上这些因素综合在一起就构成我们设计激光器所要考虑的条件。

3 实验及结果

实验中我们采用四棒平平对称腔, 棒间距离 d_m 两倍于棒镜间距 d 。 d 的大小要考虑输出光束质量和热效应导致的四根晶体棒热焦距的匹配。除此之外, 还要使平均热焦距 $f > 0.50d$ 。考虑到每根晶体棒的热焦距不同, 可以对棒间距离或泵浦功率做适当调整。在谐振腔两端靠近腔镜内侧分别放置两个直径为 9.5 mm 的光阑。谐振腔中的四个泵浦模块结构相同, 即陶瓷漫反射腔、一根 $\phi 9 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$ 镀增透膜的 Nd: YAG 晶体棒用两根 $\phi 8 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的氮闪光灯泵浦。每根灯由最大功率 8 kW 的激光电源提供能量。谐振腔镜采用径向固定, 因为径向固定比轴向固定引起的腔镜的变形小^[7]。常用的改善反射镜热变形的手段有两种^[8]: 一种是对热变形进行自动校正补偿, 二是对反射镜强制冷却, 使热变形控制在允许的范围内。我们采用强制冷却方式。激光头采用双循环水冷系统, 温度保持在 $20 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 1 \text{ }^\circ\text{C})$ 。每个激光模块的输出功率、热焦距都采用单棒

对称平平腔进行测试。测得性能相近的模块被用于组装四棒对称平平腔。

考虑到机械问题及调整方便,在实验中我们采取调整泵浦功率的方法来匹配各个晶体棒的热焦距。在一定的泵浦功率下,微调第一根晶体棒的泵浦功率并观察激光器的输出功率。若激光器输出功率有所增长,说明四根晶体棒热焦距未达到匹配;调至输出功率达到最高时,说明晶体棒热焦距基本匹配。如此依次调整各个晶体棒的泵浦功率,经多次调整后可达到较好的效果。用功率计测量出激光器输入输出功率曲线如图 6 所示,在输入功率为 60 kW 时,激光器输出功率达到 2 105 W。

图 7 是未调整泵浦功率时激光器输入输出功率曲线图。在图 7 中可以看到,当泵浦功率分别达到 40 kW 和 55 kW 时,由于谐振腔内四根晶体棒热焦距未达到匹配,激光器不能快速通过临界点而工作在不稳区,使激光器的输出功率受到较大影响。如图 6 所示,通过调整泵浦功率使晶体棒热焦距未达到匹配后,当泵浦功率分别达到 40 kW 和 55 kW 时,激光器迅速通过临界点,减小了不稳区对激光器输出功率的影响。

输出激光光束功率密度用大功率光束光斑诊断仪进行测量,结果如图 8 所示。输出光束束腰在输出耦合镜处,在相应的距离处用大功率光束光斑诊断仪测出功率为总功率的 86 % 处的光束半径,相应的距离也需测量。利用测量出的数据我们计算出光束参数积为 24 mm · mrad。采用激光功率计对输出激光功率的稳定性进行测量,在 1 980 W 功率输出时,运行 6 h,功率起伏为 36 W,不稳定性小于 2 %。

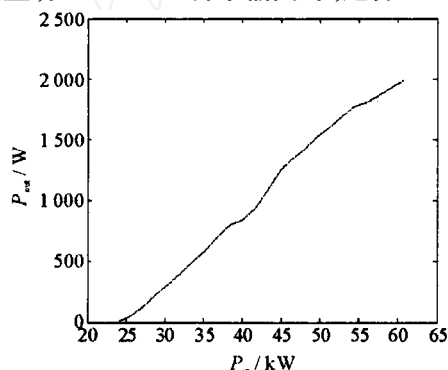


Fig. 7 Experimentally measured four rods laser output power without adjusting input power vs electrical input power

图 7 未调整泵浦功率时激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线

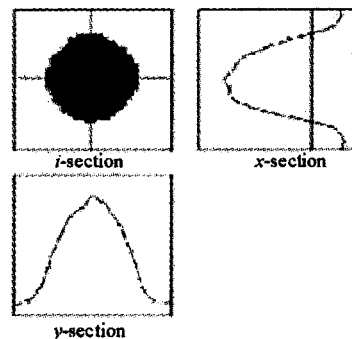


Fig. 8 Near-field intensity distribution of 1.9 kW output laser beam

图 8 功率 1.9 kW 时近场激光光束的强度分布

实验结果得到输出功率为 2 105 W, 光束参数积为 24 mm · mrad 的激光输出, 总的电光转换效率为 3.5 %。激光器随着泵浦模块(晶体棒)的增加, 输出功率也随之增加, 同时相对于单棒 Nd:YAG 激光器的光束质量没有明显下降。激光输出功率范围与光束质量之间可以进行优化折中。棒间的热焦距匹配可以起到增大稳定区的作用。这个结果可以对更高功率泵浦多棒谐振腔固体激光器研究提供参考。

参考文献:

- [1] Driedger K P, Ifflander R M, Weber H. Multirod resonators for high-power solid-state lasers with improved beam quality[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(4): 665—673.
- [2] Kumkar M, Wedel B, Richter K. Beam quality and efficiency of high-average-power multirod lasers[J]. *Optics and Laser Technology*, 1992, 24(2): 67—72.
- [3] Vittorio M. Resonator for solid-state laser with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. *Appl Opt*, 1986, 25(1): 107—117.
- [4] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. New York, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.
- [5] Li Q, Wang Z M, Zuo T C. A method measuring thermal lens focal length of all rays polarized in radial and tangential direction of high power Nd:YAG laser[J]. *Opt Comm*, 2004, 241: 155—158.
- [6] Li Q, Wang Z M, Wang Z Y, et al. 600 W lamp pumped CW Nd:YAG laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(9): 535—537.
- [7] 孙峰, 程祖海, 张耀宁, 等. 激光器腔镜夹持方式对热变形的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(8): 751—754. (Sun F, Cheng Z H, Zhang Y N, et al. Effects of clamping methods for laser mirrors on thermal deformation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 751—754)
- [8] 黄涛, 林明辉, 程祖海. 强激光全反腔镜热变形模型及计算[J]. *强激光与粒子束*, 1995, 7(3): 366—372. (Huang T, Lin M H, Cheng Z H. Thermal deformation model and numerical calculation of the metal resonator mirror of a high power laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(3): 366—372)

Four-rod resonator for krypton lamp pumped CW Nd:YAG laser with high power output

FANG Ming-xing, LI Qiang, JIANG Meng-hua, ZUO Tie-chuan

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: We present a four-rod series resonator CW Nd:YAG laser for the requirement of industrial application in this paper. The symmetrical resonator laser has been developed and is rated at 2 105 W output power with beam parameter product of 24 mm · mrad. The system's total electro-optics efficiency of lamp pumped YAG crystal is as high as 3.5 %. The main factors which affect operation of high power solid-state laser module are different positions and thermal focal lengths of crystal rods, and so on. These factors are theoretically analyzed. Conclusions are drawn that the resonator would have the biggest steady range when the rods in it are symmetrically arranged and thermal focal lengths of the rods being not matched can be compensated by adjusting input power of laser system.

Key words: Nd:YAG laser; Four-rod resonator; Thermal focal length; Beam quality

& & & & & & & & & & & & & &

征 订 单

Chinese Optics Letters、《中国激光》、《光学学报》由中国光学学会、中国科学院上海光学精密机械研究所主办，中国科学出版社出版，国内外公开发行。

Chinese Optics Letters——中国光学界唯一的全英文学术期刊，发表周期短，及时报道国内外光学及相关领域的重要新成果。

《中国激光》——中国唯一全面反映激光领域最新成就的专业学报类期刊。

《光学学报》——报道我国光学领域的各个分支科技的新概念、新成果、新进展，学术性强。

三刊均被《EI》、《CA》、《INSPEC》、《AJ》等收录。

Chinese Optics Letters，月刊，每期 64 页，大 16 开，进口铜版纸印刷。定价：35 元/期。

《中国激光》，月刊，每期 144 页，大 16 开，进口铜版纸印刷。定价：25 元/期。

《光学学报》，月刊，每期 160 页，大 16 开，进口铜版纸印刷。定价：35 元/期。

可通过邮局征订或直接与编辑部联系。

通信地址：上海 800-211 信箱 光学期刊联合编辑部

邮政编码：201800 电话：021-69918427 传真：021-69918011

网址：www.opticsjournal.net

联系人：戴玉珍

编辑部尚有部分过刊，六折优惠。