

文章编号: 1001-3806(2015)03-0377-04

## 热透镜效应补偿的高功率 Nd:YAG 激光器的优化设计

吴羽<sup>1</sup>, 龙晓莉<sup>1</sup>, 焦中兴<sup>2</sup>, 何广源<sup>2</sup>, 张倩<sup>1</sup>

(1. 广州大学 实验中心, 广州 510006; 2. 中山大学 理工学院 光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

**摘要:** 为了获得高功率、高光束质量的 1064nm 激光, 采用凹透镜作为补偿透镜来补偿激光棒的热透镜效应。对补偿透镜的选取进行理论分析, 并使用所设计的包含补偿透镜的平平谐振腔 Nd:YAG 激光器进行了实验验证。在实验中, 使用焦距为 250mm 的凹透镜、透过率为 30% 的输出耦合镜, 获得了 55W 的高功率、高光束质量的 1064nm 激光输出。结果表明, 此项研究对高功率、高光束质量激光器谐振腔的设计是有帮助的。

**关键词:** 激光器; Nd:YAG 激光器; 热透镜效应; 光束质量; 谐振腔

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.021

### Optimal design of high power Nd:YAG laser based on compensation of thermal lens effect

WU Yu<sup>1</sup>, LONG Xiaoli<sup>1</sup>, JIAO Zhongxing<sup>2</sup>, HE Guangyuan<sup>2</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>

(1. Laboratory Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Physics and Engineering, SUN Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** In order to obtain 1064nm laser with high power and high beam quality, a laser resonator was designed to solve thermal lens effect with a concave lens as compensation lens. The selection of the compensation lens was analyzed. A Nd:YAG laser with a compensation lens and a plano-plano cavity was verified in the experiment. High beam quality 55W 1064nm laser was obtained when the focal length of the concave lens was 250mm and the transmittance of the output mirror was 30%. This research is helpful to the design of laser resonators with high power and beam quality.

**Key words:** lasers; Nd:YAG laser; thermal lens effect; beam quality; resonator

## 引言

二极管抽运 Nd:YAG 激光器由于具有高功率、高效率、成本低廉、寿命长等优点, 已经被广泛应用于工业生产、科学研究、医疗诊断、环境监测等领域。随着激光应用的发展, 人们对固体激光器的输出功率、光束质量、稳定性等方面的要求逐渐提高。热透镜效应作为影响固体激光器性能的关键因素之一, 在谐振腔设计中已经得到广泛关注<sup>[1-6]</sup>。为了获得高功率、高光束质量的激光输出, 必须采取一定的措施对激光棒的热透镜效应进行补偿。作者以 1064nm Nd:YAG 激光器为研究对象, 采用 He-Ne 激光探测法测量了热透镜焦距, 并根据测量到的参量, 对 Nd:YAG 激光器进行了谐振腔的优化设计, 选择合适的补偿透镜对激光棒的热

透镜效应进行了补偿。理论分析了激光棒主截面处光腰半径分布曲线以及失调灵敏度曲线图, 并做了相应的实验研究。实验表明, 在激光器谐振腔内加入凹透镜补偿 YAG 激光棒的热透镜效应, 并通过合理选择凹透镜及腔结构, 可获得 55W 激光输出, 光束质量  $M^2 \approx 4.0$ 。

## 1 Nd:YAG 激光器的优化设计

### 1.1 激光器谐振腔结构

要想获得高功率、高光束质量的 1064nm 激光, 首先必须解决影响固体激光谐振腔输出的最主要因素, 即固体激光工作物质中存在的热透镜效应。传统的固体激光器在高功率工作时, 由于热透镜效应, 输出的激光光束质量变差并且功率下降, 为此, 可以采用在谐振腔内加入负透镜的方法来补偿热透镜效应。

MAGNI 提出的动态稳定腔概念为设计和优化谐振腔提供了理论基础<sup>[7-9]</sup>。所谓的动态稳定腔满足以下条件: (1) 有较大的基模体积, 充满增益介质; (2) 基模体积大小对热透镜焦距的变化不敏感; (3) 腔镜有

基金项目: 广州市教育科学十二五规划 2014 年度资助项目(1201431248)

作者简介: 吴羽(1982-), 女, 硕士, 主要从事光电技术方面的研究。

E-mail: wuyu8320@163.com

收稿日期: 2014-04-02; 收到修改稿日期: 2014-07-17

最低的失调灵敏度。作者尝试只在简单腔内加入一个凹透镜,补偿 YAG 激光棒的热透镜效应,并通过优化谐振腔的结构,拟用最简单的结构实现有一定动态稳定性的谐振腔。

本文中讨论两种结构:简单平平腔结构和加入凹透镜补偿热透镜效应的平平腔结构。

### 1.2 凹透镜的补偿作用

首先,只考虑 YAG 激光棒的热透镜效应,把 YAG 激光棒理想化为一个厚透镜做计算。采用图 1 所示的谐振腔结构,考虑有补偿凹透镜和没有补偿凹透镜两种情况。根据 ABCD 光线变换矩阵理论,计算中得到 YAG 激光棒主截面处的光腰半径  $w_{YAG}$  随热透镜的光焦度  $D$  (热透镜焦距的倒数) 变化的关系曲线 (见图 2)。计算中使用的参量如下:总腔长为 286mm, YAG 激光棒长度为 120mm,凹透镜焦距为 250mm, YAG 棒端面到凹透镜的距离为 25mm。

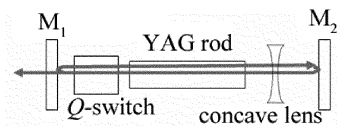


Fig. 1 Schematic of Nd:YAG laser cavity

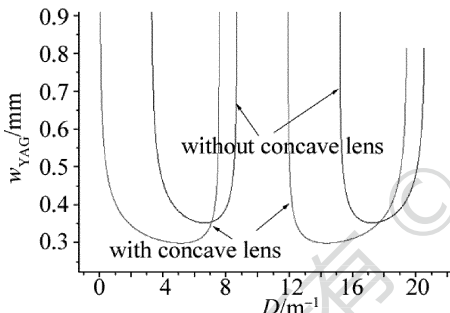


Fig. 2 Optical power vs. beam waist radius at the main section of YAG laser rod

由图 2 可以看到,激光器有两个稳区,其中左边瓣对应于第二稳区,右边瓣对应于第一稳区。腔内加入补偿透镜后,激光器的两个稳区发生了右移,这样有利于让激光器工作在高的抽运电流下,以得到高功率的激光输出。因为在高抽运电流下,激光二极管 (laser diode, LD) 的抽运功率越大,热透镜的光焦度也越大。由图 2 也可知,加入补偿凹透镜后,稳区宽度变窄,相应地最小光腰半径增大。一般地,稳区宽度  $\Delta D$  与最小光腰半径  $w_{min}$  满足以下关系:

$$w_{min}^2 \cdot \Delta D = \frac{2\lambda}{\pi} \quad (1)$$

若希望激光器有较大的基模体积,则要求  $w_{YAG}$  较大。从图 2 中也看到,在稳区的边缘附近,  $w_{YAG}$  会趋于无穷大,然而在此状态下的激光器十分不稳定,输出功率波动严重,无法正常应用。激光器的最佳工作点

在  $w_{YAG}$  为最小值  $w_{min}$  的位置。一般希望  $w_{min}$  有较大的值,以便让基模充满增益介质。在腔内加入补偿凹透镜后,  $w_{min}$  有所增大,更有利于激光器基模运转,但是,同时引起的稳区的变窄也必须予以考虑。

光束质量因子可以近似为<sup>[10]</sup>:

$$M^2 = \frac{d^2}{4w_1^2} \quad (2)$$

式中,  $d$  为激光棒直径,  $w_1$  为激光棒内基模高斯光束的半径。

分别将两种腔型的  $w_{min}$  代入上面公式中的  $w_1$ , 激光棒有效增益直径  $d$  取为 2mm, 计算得到无补偿透镜时,  $M^2 = 11.2$ ; 有补偿透镜时,  $M^2 = 8.0$ 。可见,加入补偿凹透镜后,光束质量有了明显的提高。

### 1.3 凹透镜的选择

本实验室使用的抽运模块抽运电流范围为 0A ~ 25A, 抽运模块 LD 阈值电流为 8A。使用的 YAG 激光棒长度为 120mm, 直径为 4mm。采用 He-Ne 激光器探测法, 测量了激光棒的热透镜焦距随抽运电流的变化关系, 如图 3 所示。激光器工作在大电流情况下 (12A ~ 18A), 对应的热透镜焦距范围约从 93cm ~ 26cm。

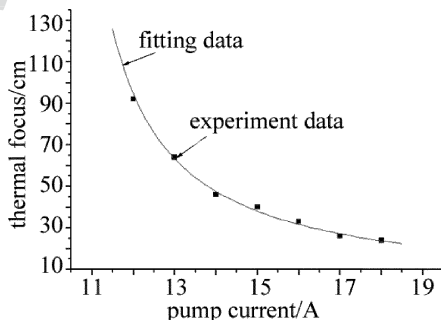


Fig. 3 Relationship of thermal focus and pump current

结合谐振腔参量,并考虑图 3 中激光棒的热透镜焦距随抽运电流变化关系,可以计算出激光器的稳区分布 (见图 4 左侧纵坐标), 并根据动态稳定腔设计理论得出谐振腔的失调灵敏度曲线 (见图 4 右侧纵坐标)。从图 4 的左侧纵坐标对应曲线看到,激光器有两个稳区,低抽运电流处对应第二稳区,高抽运电流处对应第一稳区。实验条件限制抽运电流只能在 0A ~

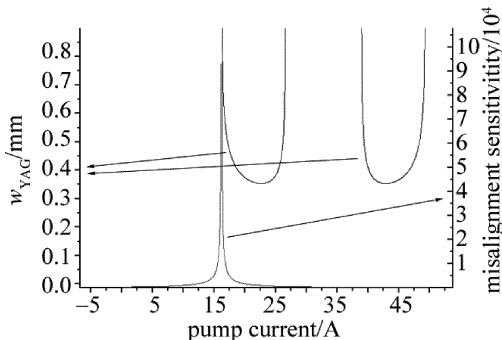


Fig. 4 Stable zone and misalignment sensitivity vs. pump current

25A 调节,因此激光器只能工作于第二稳区。从图 4 的右侧纵坐标对应曲线可知,在第二稳区左边缘处(低电流位置)失调灵敏度非常大,说明激光器刚进入稳区时会非常不稳定,不能有效地正常工作。然而,随着抽运电流的增加,失调灵敏度迅速降低,在第二稳区的中部和右部,失调灵敏度已经与第一稳区的值相近,说明此时激光器能够很好地正常工作。

## 2 实验研究与分析

实验中激光器结构如图 1 所示。其中 Nd:YAG 抽运模块的抽运源由 5 组最大功率为 120W 的 808nm 的 LD 组成,在抽运电流为 25A 时,模块具有最大抽运功率为 500W。激光器的增益介质是直径为 4mm,长度为 120mm 的 Nd:YAG 激光棒,其 Nd 掺杂体积分数为 0.009。激光棒两端面为平面,并镀有 1064nm 增透膜。 $Q$  开关使用双头声光  $Q$  开关,具有两输入端,能同时在  $x$  和  $y$  方向产生衍射。它比单头的声光  $Q$  开关具有更高的衍射损耗,能够关断更高功率的激光。 $Q$  开关的重复频率范围从 1Hz ~ 100kHz。图 1 中, $M_2$  为 1064nm 高反镜, $M_1$  为 1064nm 输出镜, $M_1$  的透过率为 5% 到 30% 不等;凹透镜的焦距为 250mm,两面镀有 1064nm 增透膜。

首先,对比了在相同腔长下,谐振腔内没有凹透镜和含有凹透镜时候,激光输出功率的差异。两者谐振腔的长度均约为 290mm, $M_1$  均为输出耦合器(output coupler, OC)。两者的 1064nm 激光输出功率曲线见图 5。无凹透镜时,激光器的抽运电流阈值约 11.7A,而加入凹透镜后,抽运电流阈值约 16.8A,后者比前者高了许多。其主要原因是加入凹透镜后,激光器的稳定区往高抽运电流方向发生了偏移。虽然加入凹透镜后,抽运电流阈值提高了,但激光器的斜效率提高了许多。在高抽运电流状态下,有凹透镜的谐振腔比无凹透镜的谐振腔的激光输出功率要高。

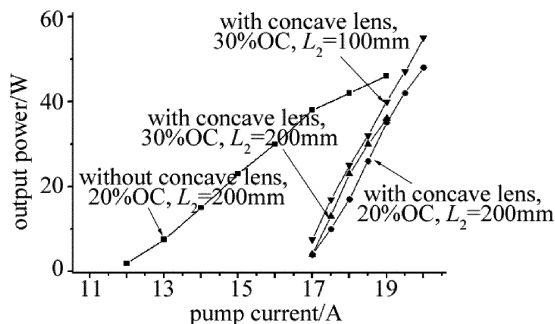


Fig. 5 Output power vs. pump current in different conditions

实验中,分别采用透过率为 5%, 10%, 20% 和 30% 的  $M_1$ , 结果发现 30% 的  $M_1$  的效果最好,获得的 1064nm 激光输出功率最大(见图 5)。这是由于高透

过率的输出耦合镜有利于把腔内的激光能量提取出来,从而得到更高的输出功率,但是并不是透过率越大越有利于输出功率的提高。根据理论分析,输出镜的透射率为 30% 到 40% 比较合适。由于只改变了输出耦合镜的透过率,其位置没有改变,所以两者的阈值电流也是基本一致的。

接着,缩短了凹透镜一臂的长度,从 200mm 缩短到 100mm,凹透镜的位置不变。得到的结果是,输出功率有所提升,原因是短腔具有更大的菲涅耳数,衍射损耗更低。此腔结构与图 4 中数值计算的腔型一致。可以看到,图 4 中数值计算得到的阈值电流(稳区的左边缘)为 16.3A,而图 5 中对应的实验值为 16.4A,两者基本吻合。用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)记录了不同抽运电流下,激光的输出光斑的图样,见图 6。从图中能看到激光器从多模到单模的变化情况,对应着前面描述的激光器从非稳态到稳态的变化。抽运电流刚超过阈值时,输出功率十分不稳定;电流达 17.5A 时,功率波动超过 10%,此时输出光斑形状不规则,旁瓣较强,中心较弱,处于多模状态;电流从 18A 提高到 19.5A,光斑中心强度逐渐增强,旁瓣强度逐渐减弱,此过程对应激光器从稳区边缘高失调灵敏度到稳区中央低失调灵敏度的过渡(见图 4);抽运电流大于 20A 后,旁瓣消失,光斑强度集中在中心处,光斑呈圆形;从图 6 中的大图可以看到,抽运电流为 21A 时,光斑的水平垂直方向的截面形状均接近高斯分布。使用透过率为 30% 的输出耦合镜,重复频率为 8kHz,在抽运电流为 20A 时,得到 55W 的激光输出。使用刀口法测量得到光束质量  $M^2 \approx 4.0$ 。

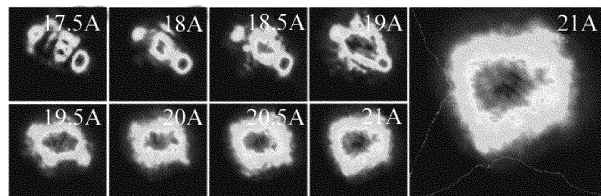


Fig. 6 Laser spots changing with the pump current

## 3 结论

对 1064nm Nd:YAG 激光器的热透镜效应补偿进行了理论和实验的研究。通过在谐振腔内加入补偿凹透镜,并对谐振腔结构进行优化设计。利用所设计的谐振腔结构,通过实验优化,获得了 55W 的 1064nm 激光输出,在保证输出高功率的前提下,提高了激光光束质量,达到国内先进水平,具有实际意义。

### 参 考 文 献

[1] HE G Y, GUO J, WANG B, et al. Generation of radially polarized beams based on thermal analysis of a working cavity[J]. Optics Ex-



- press, 2011, 19(19): 18302-18309.
- [2] NIU R L, LIU J, LIU Ch Ch, *et al.* Theoretical investigation on thermal lensing effects of Yb:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> in diode-pumped lasers[J]. *Optik*, 2011, 122(21): 1931-1934.
- [3] WANG Y, INOUE K, KAN H, *et al.* Study on thermally induced depolarization of a probe beam by considering the thermal lens effect [J]. *Journal of Physics*, 2009, D42 (23): 235108.
- [4] HAO H, ZHANG Y, HE Y P. Thermal effect of end-pumped laser crystal with circular cross-section [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 49-52 (in Chinese).
- [5] WYSS E, ROTH M, GRAF T, *et al.* Thermo-optical compensation methods for high-power lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 2002, 38 (12): 1620-1628.
- [6] LI L, GAN A Sh, QI B, *et al.* Thermal effect of LD end-pumped Nd:YAG crystal with variable thermal conductivity [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 612-616 (in Chinese).
- [7] MAGNI V. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental modes and high alignment stability [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(1): 107-117.
- [8] MAGNI V, VALENTINI G, SILVESTRI S D. Recent developments in laser resonator design [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1991, 23(9): 1105-1134.
- [9] CERULLO G, de SILVESTRI S, MAGNI V, *et al.* Output power limitations in CW single transverse mode Nd:YAG lasers with a rod of large cross-section [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1993, 25 (8): 489-500.
- [10] ZHANG S M. Research on high-brightness all-solid-state laser and continuous-wave intracavity mid-infrared optical parametric oscillator based on PPLN [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007: 36-37 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©