

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0064-04

# 用于减小微细孔锥度的激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 基模激光器

殷 聪<sup>1</sup> 黄声野<sup>2</sup> 张世文<sup>3</sup> 石春英<sup>1</sup> 刘秀英<sup>1</sup> 王捍平<sup>1</sup> 蔡 山<sup>1</sup> 钱 进<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国计量科学研究院, 北京 100013; <sup>2</sup> 中国兵器装备研究院, 北京 100089)  
<sup>3</sup> 华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要** 激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 激光器在精密加工领域得到了广泛的应用。介绍了一种结构简单的用于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷片微细钻孔的 LD 侧面抽运 Nd:YAG 声光调 Q 激光器。通过优化谐振腔型提高了光束质量, 在用于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷片表面加工微细孔时有效减小了孔的锥度。分析了谐振腔的设计思路, 给出了谐振腔的具体结构。实验表明激光器在 10 kHz 重复频率时, 基模输出平均功率超过 20 W, 脉冲宽度约为 200 ns, 双方向光束质量  $M^2$  因子值均小于 1.5。

**关键词** 激光器; 基模; 陶瓷片; 微细钻孔; 锥度

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201037s1.0064

## Laser Diode Side Pumped Nd:YAG TEM<sub>00</sub>-Mode Laser for Reducing Taper of Micro Holes

Yin Cong<sup>1</sup> Huang Shengye<sup>2</sup> Zhang Shiwen<sup>3</sup> Shi Chunying<sup>1</sup> Liu Xiuying<sup>1</sup>

Wang Hanping<sup>1</sup> Cai Shan<sup>1</sup> Qian Jin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> National Institute of Metrology, Beijing 100013, China  
<sup>2</sup> China South Industry Academe, Beijing 100089, China  
<sup>3</sup> North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** Laser diode (LD) pumped Nd:YAG laser is widely used in precise manufacture. A kind of simplified LD side pumped acousto-optic Q-switched Nd:YAG laser used for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic wafer micro drilling is described. The taper of the hole in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic wafer is reduced effectively when the laser beam quality is optimized by modifying the resonator structure. The TEM<sub>00</sub>-mode output power is above 20 W and the pulse width is about 200 ns when the laser is working at 10 kHz. And the  $M^2$  factor of the beam is lower than 1.5 in each direction.

**Key words** lasers; TEM<sub>00</sub>-mode; ceramic wafer; micro drilling; taper

### 1 引 言

激光二极管(LD)抽运 YAG 激光器在激光加工,尤其在微细加工技术领域中发挥着重要作用,具有不可替代的优势<sup>[1]</sup>。激光钻孔是最早达到实用化的激光加工技术,也是激光加工的主要应用领域之一。该技术可以对一些用传统加工方法无法加工的硬度大、熔点高的材料进行钻孔。对这一技术的研究也屡见报道<sup>[2~6]</sup>。

用激光进行较大孔径钻孔时,锥度的影响相对不突出。但在加工微细孔时,锥度的大小就成为衡量加工品质优劣的重要标志之一。关于在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷片上加工微细孔所得锥度的研究相对较少。北京航空航天大学史进等<sup>[7]</sup>曾介绍过令激光倾斜入射工件,以减小在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷片上钻孔锥度的方法。

本文结合生产过程中暴露的问题,分析了光束质量对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷片上钻孔锥度的影响。通过优

收稿日期: 2010-03-17; 收到修改稿日期: 2010-06-18

作者简介: 殷 聪(1977—),男,博士,助理研究员,主要从事激光二极管及激光二极管抽运固体激光器的设计与应用等方面的研究。E-mail: yincong@nim.ac.cn

化谐振腔型、简化谐振腔结构,不仅提高了激光器的可靠性,降低了设备的复杂程度和生产成本,而且改善了光束质量,达到了减小钻孔锥度的目的。钻孔所用激光束双方向光束  $M^2$  因子值不大于 1.5, 10 kHz 下输出 21.0 W 平均功率,1 kHz 下输出 3.7 W 平均功率。钻孔锥度被控制在 10~50  $\mu\text{m}$  以内,满足工业制造的需求。

## 2 谐振腔理论分析

文中涉及的 LD 抽运 Nd:YAG 激光器为自行设计并研制。其中增益介质的热透镜效应和热致双折射效应是决定激光器腔型以及输出特性的主要因素,尤其在输出基模时,其影响更为明显。设计谐振腔参数时应使激光器工作在热稳区内。

Vittorio Magni<sup>[8]</sup>对谐振腔的热稳态理论进行了详细的分析。谐振腔模型如图 1 所示。图 1(a) 为含有一个增益介质的谐振腔结构示意图,其中增益介质长度为  $l$ ,腔镜的曲率半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ 。增益介质在抽运光作用下呈现出类似透镜的聚光特性,如图 1(b) 所示,等效热透镜的主平面到晶体端面的距离为  $h$ 。热透镜主平面到腔镜的距离分别为  $L_1$  和  $L_2$ 。图 1(a) 的结构即被等效为含有一个薄透镜的谐振腔结构,如图 1(c) 所示。

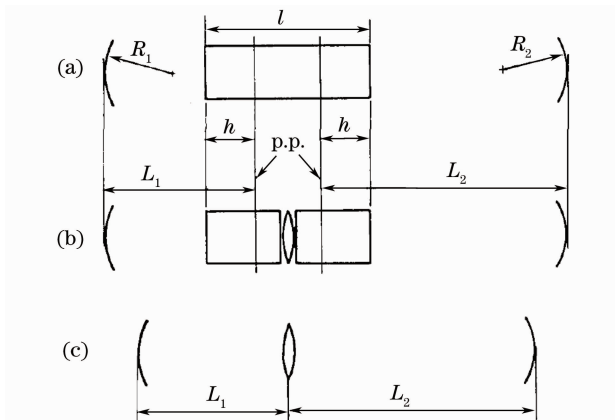


图 1 谐振腔模型。(a) 含有热透镜效应增益介质的谐振腔,(b) 增益介质内的等效热透镜,(c) 含有一个薄透镜的谐振腔

Fig. 1 Model of resonator. (a) a resonator with a thermal lens effect crystal, (b) thermal lens effect in the crystal, (c) equivalent resonator with a thin lens

对 Magni 关于热稳腔理论的分析过程不再赘述,其结论之一给出了谐振腔达到热稳定时谐振腔热稳区宽度与热透镜主平面上光斑尺寸的关系式

$$w_{30}^2 = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{1}{|\Delta(1/f)|}, \quad (1)$$

式中  $\Delta(1/f)$  为热稳区宽度,  $w_{30}$  为达到热稳定条件时热透镜主平面上的光斑尺寸(光强  $1/e^2$  处的光斑半径),  $\lambda$  为输出激光的波长。可见,谐振腔的热稳区宽度与输出激光的基模体积成反比。

此外,分析结果显示存在两个宽度相等的宽度为  $\Delta(1/f)$  热稳区,或者一个宽度为  $2\Delta(1/f)$  的热稳区。图 2 为热透镜主平面上光斑尺寸  $w_3$  随参数  $x$  变化的曲线。

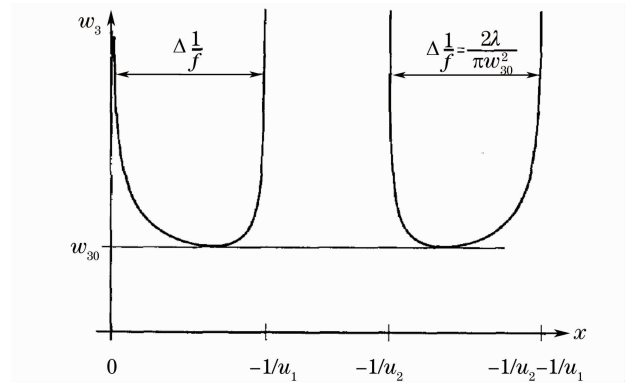


图 2 热透镜上光斑尺寸随  $x(x=1/f-1/L_1-1/L_2)$  的变化曲线

Fig. 2 Spot size on the lens as a function of  $x(x=1/f-1/L_1-1/L_2)$

图 2 中,

$$x = 1/f - 1/L_1 - 1/L_2, \quad u_1 = L_1(1 - L_1/R_1),$$

$$u_2 = L_2(1 - L_2/R_2),$$

$$w_{30}^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{|2xu_1u_2 + u_1 + u_2|}{[(1 - g_1g_2)g_1g_2]^{1/2}},$$

$$g_1 = -\frac{L_2}{L_1}(1 + xu_1), \quad g_2 = -\frac{L_1}{L_2}(1 + xu_2).$$

G. Cerullo 等<sup>[9]</sup>分析了热致双折射效应对激光器结构和输出特性的限制。增益介质热透镜的径向热焦距  $f_r$  和切向热焦距  $f_t$  的数值不同导致了热致双折射效应,对于 Nd:YAG 晶体,  $f_t/f_r \approx 1.2$ 。增益介质的平均光焦度可近似为  $1/f = (1/f_t + 1/f_r)/2$ 。因此仅当切向和径向形成的热稳区产生叠加,或者说平均热稳区宽度大于两个方向光焦度之间的距离,即

$$\Delta(1/f) > 1/f_r - 1/f_t = 0.18/f \quad (2)$$

时,才能满足热稳定条件。可见,由于热致双折射效应的存在,设计谐振腔时热稳区宽度不能过窄。因此,输出基模体积受到了限制。将(1)式代入(2)式得到

$$w_{30} < \left( \frac{11.1\lambda f}{\pi} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

### 3 谐振腔设计与实验

图 3 所示为实际生产中一台用于硅片钻孔和切割的多模激光器的输出特性。图中给出了调 Q 频率分别为 1 kHz 和 10 kHz 时,激光输出的平均功率曲线,以及当驱动电流为 18 A 时的激光脉冲宽度。用这种激光束在 0.6 mm 厚  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷片上加工直径小于 500  $\mu\text{m}$  的微细圆孔时会产生较严重的锥度。孔两端直径相差约 150  $\mu\text{m}$ 。该激光仅能满足大孔径钻孔的要求。

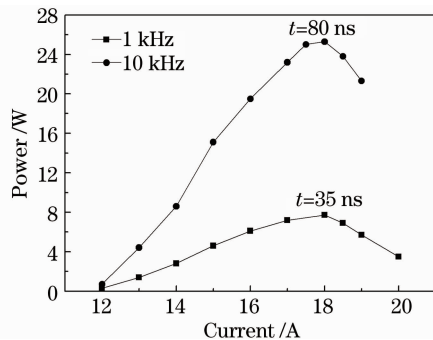


图 3 多模激光器的功率曲线

Fig. 3 Power curve of a multimode laser

以 2 节理论分析为指导,选定了谐振腔的参数并进行了实验。使用的增益介质为长 63 mm,截面直径 3 mm,掺杂原子数分数 0.6% 的 Nd:YAG 圆棒晶体。用 3 组输出特性相同的 LD 阵列按轴对称环绕 Nd:YAG 棒排列抽运。3 组 LD 阵列的总抽运功率电流比约为 21.1 W/A。LD 阵列和 Nd:YAG 棒均采用 20  $^{\circ}\text{C}$  水循环冷却。

实验中用光探测法测量 Nd:YAG 棒的热焦距。将一束 10 倍扩束的 He-Ne 激光沿 Nd:YAG 棒轴向入射,测量不产生激光状态下棒内热焦距随 LD 抽运功率变化的曲线,如图 4 所示。图中的热焦距是热透镜主平面到 He-Ne 激光束焦点间的距离。

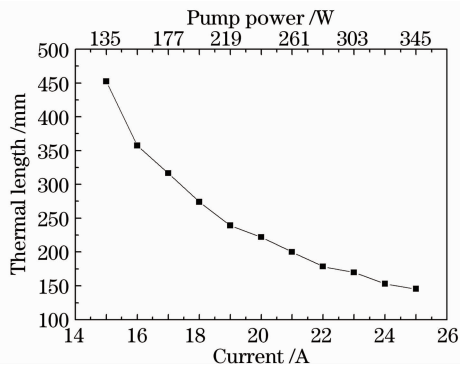


图 4 热焦距随驱动电流和抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Thermal focal length as a function of current and pump power

其中热透镜主平面到 Nd:YAG 棒顶端的距离为  $h$  (图 1),定义为

$$h = \frac{l}{2n_0}, \quad (4)$$

式中  $n_0 = 1.82$ , 为 Nd:YAG 的折射率,计算得到  $h = 17.3$  mm。图 4 中横坐标分别为驱动电流和与之对应的抽运总功率。在实际工作中,图中所示抽运功率的数值需减去激光输出功率部分。

由(3)式可知,激光模体积的大小受到晶体内热焦距的限制,也即受到 LD 抽运功率的限制。另外,为了延长 LD 阵列的工作寿命,保证激光器工作的稳定性,将激光器的驱动电流选在 18 A 附近。扣除此时输出激光功率部分,对应的热焦距长度应约为 295 mm。

优化后的谐振腔为图 5 所示的平凸腔结构。 $M_1$  为曲率半径  $R_1 = 500$  mm 的凸面 1064 nm 全反射镜,输出镜  $M_2$  为透射率 18% 的平面镜。 $L_1 = 330$  mm,  $L_2 = 680$  mm,调 Q 器件放置在  $M_1$  与激光晶体之间,选用 NEOS 公司的 33027-50-5-I 型声光调制器,同样采用 20  $^{\circ}\text{C}$  水循环冷却。实验显示调 Q 器件的位置对输出没有明显影响。

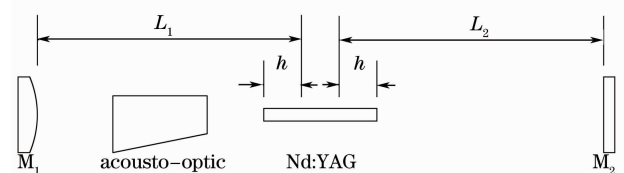


图 5 基模谐振腔结构示意图

Fig. 5 Schematic of the  $\text{TEM}_{00}$ -mode laser resonator

理论计算得到当热焦距为 295 mm 时该腔型的热稳区分布如图 6 所示。为使图形更加直观,横坐标没有采用如图 2 所示的参数  $x$ ,而是改用晶体的热焦距为横坐标,纵坐标仍为热透镜主平面上光斑尺寸。热焦距位于热稳区之内。

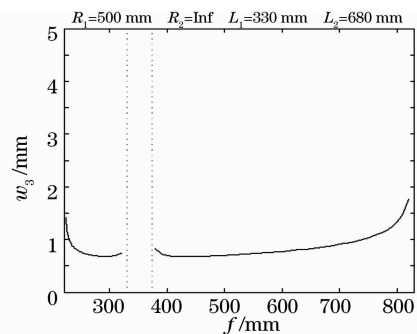


图 6 热透镜上光斑尺寸随热焦距的变化曲线

Fig. 6 Spot size on the lens as a function of thermal focal length

实验得到不同调制频率下激光器的功率-电流曲线如图 7 所示,具体输出参数列于表 1 中。

钻孔时激光器工作在 3 kHz。上述多模激光输出平均功率 16.7 W,脉宽约 45 ns。优化后的输出光束为基模,平均功率 14 W,脉宽约 170 ns。优化后谐振腔腔长增加了近一倍。这是脉冲宽度变宽的

主要因素,导致输出激光的峰值功率下降,钻孔速度下降为原来的 1/4~1/5。但钻孔锥度从约 150 μm 减小到 10~50 μm,满足了微细加工的要求。还可以通过缩短腔长来压窄脉冲宽度。此时,需根据热稳腔理论计算得到特定腔长下的腔镜曲率半径以及腔镜与增益介质间的距离,使热焦距位于稳区之中。

表 1 激光器基模光束输出特性

Table 1 Output characteristic of TEM<sub>00</sub>-mode laser

Frequency /kHz	Current /A	Power /W	Pulses width /ns	Beam quality
1	15.7	3.7	160	$M_x^2 = 1.36, M_y^2 = 1.39$
2	16.7	7.8	170	$M_x^2 = 1.43, M_y^2 = 1.70$
3	18.0	14.0	170	$M_x^2 = 1.25, M_y^2 = 1.41$
4	18.0	16.3	180	$M_x^2 = 1.55, M_y^2 = 1.61$
10	18.4	21.0	200	$M_x^2 = 1.38, M_y^2 = 1.35$

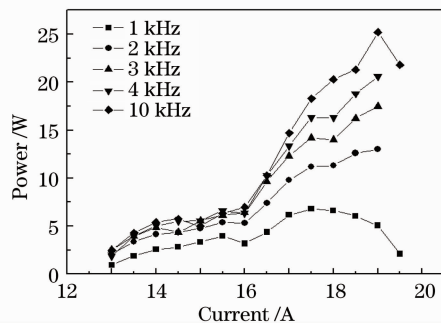


图 7 基模激光器在不同调制频率下的功率曲线  
Fig. 7 Output characteristic of TEM<sub>00</sub>-mode laser at different frequencies

### 4 结 论

针对生产过程中暴露的在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷表面进行微细钻孔时锥度过大的问题,介绍了一种结构简单的 LD 侧面抽运 Nd:YAG 激光器。理论分析了热透镜效应和热致双折射效应对激光输出特性的影响。通过优化激光器谐振腔参数得到 10 kHz 时平均功率大于 20 W,脉冲宽度约 200 ns 的基模输出。实验结果与理论分析结果相吻合。对比原有的多模激光,虽然激光峰值功率有所下降,但大大改善了光束质量,从而有效降低了钻孔的锥度,满足了实际生产的需要。

致谢 感谢华北光电技术研究所张银江工程师提供的技术支持。

### 参 考 文 献

- 1 Malcolm C. Gower. Industrial applications of laser micromachining[J]. *Opt. Express*, 2000, 7(2): 56~67
- 2 Wang Hongjie, Wang Yanan, Peng Jianqiang *et al.*. Applications of laser minutely cutting technology in fabricating silicon solar cells[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2137~2139  
王宏杰, 王亚楠, 彭建强 等. 激光精密刻蚀技术在硅太阳能电池制备工艺中的应用[J]. *光子学报*, 2008, 37(11): 2137~2139
- 3 Bian Fei, Xiao Zexin. Theoretical analysis on improving the quality of laser drilling and technique optimization[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(s1): 355~358  
卞 飞, 萧泽新. 提高激光打孔质量的理论分析与工艺优化的研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(s1): 355~358
- 4 A. Luft, U. Franz, A. Emsermann *et al.*. A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling[J]. *Appl. Phys. A*, 1996, 63: 93~101
- 5 Cui Jianfeng, Zhao Jing, Fan Zhongwei *et al.*. Study on LD-pumped Nd:YAG laser cutter for silicon wafer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 829~834  
崔建丰, 赵 晶, 樊仲维 等. 厚硅片的高速激光切片研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 829~834
- 6 Wang Hongjie, Guo Wengang, Dong Zhaohui *et al.*. Application of laser etching technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 469~472  
王宏杰, 郭文刚, 董兆辉 等. 激光刻蚀技术的应用[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 469~472
- 7 Shi Jin, Yang Helai, Zhang Xiaobing. Application study on new method of laser precise drilling of ceramic material[J]. *Applied Laser*, 2005, 25(3): 155~157  
史 进, 杨贺来, 张晓兵. 陶瓷小孔激光精密加工新方法应用研究[J]. *应用激光*, 2005, 25(3): 155~157
- 8 Vittorio Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability[J]. *Appl. Opt.*, 1986, 25(1): 107~117
- 9 G. Cerullo, S. De Silvestri, V. Magni *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: 489~500