

高功率高光束质量脉冲 Nd: YAG 激光器*

王宝华, 李 强, 姜梦华, 惠勇凌, 雷 旬

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

摘 要: 以实现高功率、高光束质量的脉冲激光输出为目的, 对非对称平-凹谐振腔的结构进行了理论分析。设计出了高功率、高光束质量非对称放置的平-凹谐振腔、双氙灯泵浦的脉冲 Nd: YAG 激光器。当占空比为 9% 时, 实现输出激光平均功率近 480 W, 光束参数积优于 $12.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 电光转化效率近 4%, 与理论分析吻合, 可用芯径 $300 \mu\text{m}$ 的光纤传输, 不稳定性优于 $\pm 1\%$ 。加工实验证明有较好的质量: 切割材料为不锈钢, 厚度为 3 mm 时、切割速度为 0.6 m/min 和厚度为 1.5 mm、切割速度为 1.2 m/min 时, 两种情况下所得切缝宽度均为 $250 \mu\text{m}$, 且切割上下沿光滑。

关键词: 脉冲固体激光器; Nd: YAG 激光器; 谐振腔; 热焦距; 光束质量

中图分类号: TN 248.1 **文献标志码:** A

目前国内外以激光二极管作为泵浦源的连续全固体激光器, 由于有较高的效率和较好的光束质量在材料切割和焊接方面得到了大量应用。但对于有一定峰值功率(数 kW)和平均功率(数百 W)的加工应用要求(如切割和焊接), 二极管泵浦的全固态激光器的峰值功率受到了限制, 而且高功率二极管的成本昂贵, 而自由运转的脉冲灯泵浦固体激光器因其性价比高、在材料加工领域仍有广泛应用^[1]。工业应用中, 金属和非金属材料的切割和焊接要求激光器具有较高的功率输出和较好的光束质量, 而灯泵浦的固体激光器有较强的热效应^[2], 在高功率输出的前提下, 改善灯泵浦固体激光器的光束质量, 具有实际意义。本文主要针对自由运转的脉冲灯泵浦固体激光器进行了腔型的设计优化, 保证输出高功率的前提下, 提高了激光光束质量, 并进行了初步的不锈钢切割加工实验。

1 理论分析

1.1 激光器谐振腔结构

固体激光器的光束质量由谐振腔的相关参数决定, 谐振腔采用稳定腔。平-平对称腔虽然能够保证 G 参数随热焦距的变化在稳定区内移动, 但在高激光功率输出的情况下, 光束质量较差, 一般当激光功率为 $500 \sim 550 \text{ W}$ 时, 光束参数积为 $20 \sim 24 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ^[3], 只能用芯径 $d_{\text{core}} \geq 600 \mu\text{m}$ 的光纤耦合输出^[4]。尝试采用其它稳定腔型用以改善激光器的光束质量, 尤其是改变激光器输出光束的远场发散角, 同时还要保证较大的基模光斑半径, 这样能够保证高激光功率输出。理论认为, 非对称结构的平-凹谐振腔能够在牺牲一定稳定区域的条件下实现此目的。

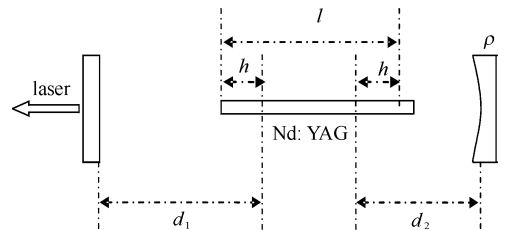


Fig. 1 Optical resonator
图 1 谐振腔结构简图

图 1 所示为谐振腔结构简图, 其中: d_1 为输出镜到晶体棒第一主面的距离, l 为晶体棒的几何长度, d_2 为全反镜到晶体棒第二主面的距离, $h = l/2n$, 其中 n 为晶体棒的折射率, ρ 为全反镜凹面的曲率半径。

从图 1 建立的谐振腔模型出发, 根据光学矩阵理论^[5], 可得基模光束的束腰半径

$$\omega_0^2 = (\lambda L^* / \pi) [g_2 / g_1 (1 - g_1 g_2)]^{1/2} \quad (1)$$

基模光束远场发散半角

$$\theta_0^2 = (\lambda / \pi \omega_0)^2 \quad (2)$$

多模光束远场发散半角

* 收稿日期: 2008-06-16; 修订日期: 2009-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(60678014)

作者简介: 王宝华(1981—), 男, 硕士, 实习研究员, 主要从事固体激光技术研究; bhwang@semi.ac.cn.

$$\theta_m^2 = \frac{(R/L^*)^2}{g_2/g_1(1-g_1g_2) + (d_1/L^*)^2} \quad (3)$$

式中: $\lambda=1.064 \mu\text{m}$; $n=1.82$; R 为晶体棒半径; f 为热焦距; $L^* = (1-l/nf)^{1/2}(d_1+d_2) + l/n - d_1d_2/f$; $g_1 = (1-l/nf)^{1/2} - d_2/f$; $g_2 = (1-l/nf)^{1/2} - L^*/\rho - d_1/f$; 由式(2)、式(3)得多模激光输出时的光束质量因子

$$M^2 = \theta_m^2/\theta_0^2 \quad (4)$$

因此, 光束参数积为

$$\chi = \lambda M^2/\pi \quad (5)$$

为了确定 d_1 和 d_2 的最佳取值, 假设热焦距 f 固定不变, 谐振腔的几何总长度 L 不变, 理论计算中设 $l=160 \text{ mm}$, $R=4 \text{ mm}$, $L=720 \text{ mm}$, $\rho=2000 \text{ mm}$, $f=300 \text{ mm}$ (f 随泵浦功率的增加而减小, 可由实验测得, 此处为泵浦灯输入电功率为 12 kW 时的热焦距), 根据以上公式, 进行模拟计算, 当 d_2 在 $44\sim 560 \text{ mm}$ 范围内变化时, 得到图 2、图 3 关系曲线。

从图 2、图 3 中可知, 当 $d_2=205\sim 260 \text{ mm}$ 时, 基模光束的束腰半径较大, 基模和多模光束的远场发散角较小, 光束参数积较小。当 d_2 在此区间内选值时, 可得到大的模体积, 进而得到高激光功率的输出。大的基模光斑和小的远场发散角有利于激光束的传输变换和聚焦, 更适合加工应用。

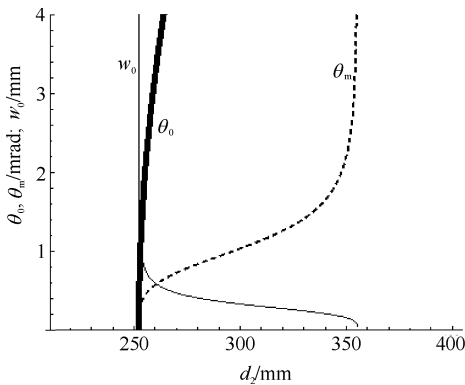


Fig. 2 Radius of beam waist of TEM_{00} , divergence of multi-mode and TEM_{00} vs d_2

图 2 基模光束束腰半径、基模与多模远场发散半角随全反镜到晶体棒第二主面距离 d_2 的变化关系

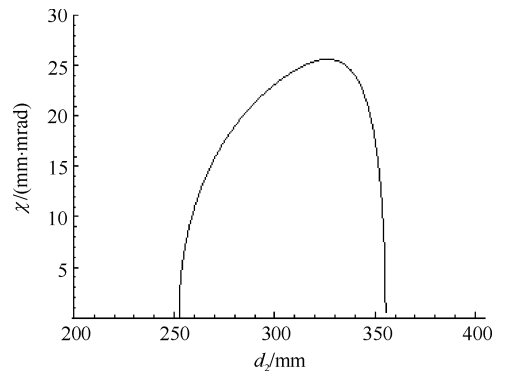


Fig. 3 Beam parameter product vs d_2

图 3 光束参数积随 d_2 变化关系

1.2 激光器谐振腔参数优化

热效应是影响光束质量的一个重要因素, 要实现高功率高光束质量的脉冲激光输出, 必须考虑热焦距对光束质量的影响。连续固体激光器在热焦距计算方面有经验公式^[6], 但自由运转的脉冲激光器与连续固体激光器的热积累效果不同, 经验公式不能直接应用于脉冲激光器的热焦距计算, 可以用实验方法获得准确的热焦距^[7]。经实验测量, 确定晶体棒的热焦距随泵浦功率变化的关系曲线, 其中, 当泵浦灯输入电功率为 12 kW 时, 晶体棒的热焦距 $f=300 \text{ mm}$ 。为确定谐振腔内各元件的相对位置, 继续进行模拟计算, 当泵浦灯输入的电功率由 $0\sim 12 \text{ kW}$ 内变化时, 基模光束束腰半径、基模光束远场发散角、多模光束远场发散角、光束参数积以及 G 参数随热焦距变化的关系曲线, 见图 4~8。

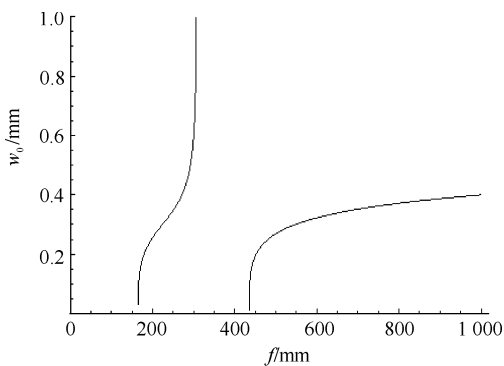


Fig. 4 Radius of beam waist of TEM_{00} vs thermal focal length

图 4 基模光束束腰半径随热焦距变化关系

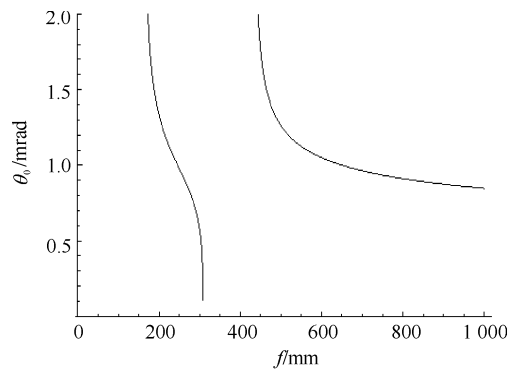


Fig. 5 Divergence of TEM_{00} vs thermal focal length

图 5 基模光束远场发散半角随热焦距变化关系

图 4~7 中的计算表明, 当泵浦灯输入电功率为 12 kW , 即热焦距 $f=300 \text{ mm}$ 时, 选取 $d_2=260 \text{ mm}$ 能够

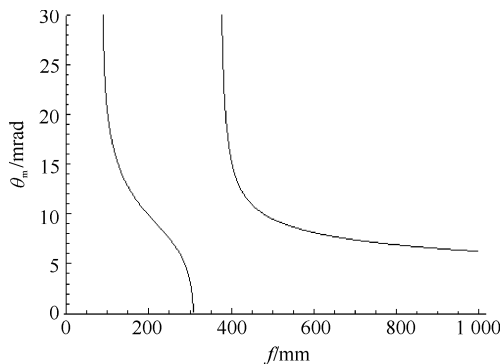


Fig. 6 Divergence of multi-mode vs thermal focal length

图 6 多模光束远场发散半角随热焦距变化关系

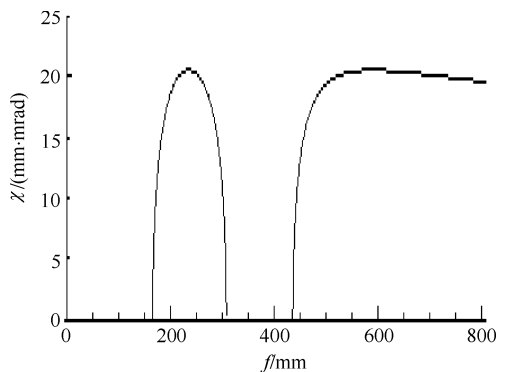


Fig. 7 Beam parameter product vs thermal focal length

图 7 光束参数积随热焦距变化关系

获得较好的光束质量的激光束输出。图 8 表明,当泵浦灯的电功率增加时,热焦距 f 减小, G 参数从点 A 下降,但并未像平-平对称腔的 G 参数规律那样经过临界稳定点 B ,而是经过了一段非稳区后又进入稳定区点 C ,图 4~7 中,热焦距 f 在 300~420 mm 处无实数解区域正好与图 8 中的非稳区部分对应。理论计算表明,虽然非对称平-凹腔提高了激光束的光束质量,但却是以牺牲较大的稳定区付出代价的,这也预示着实验中,当增加泵浦灯的电功率到达某一阶段时,输出激光的功率可能会下降少许或者持续不变,经过这段非稳区后,继续增加泵浦功率,激光输出功率继续增加。

2 实验研究

激光器主体部分采用双氙灯泵浦单棒 Nd: YAG 晶体,聚光腔为双椭圆陶瓷腔结构,晶体的掺杂原子分数为 1%,谐振腔结构如图 1 所示,谐振腔各参数与理论计算中的参数相同,输出镜透射率 $T=70\%$,已优化至最佳^[8]。泵浦灯的内阻在工作稳定后基本不变,当泵浦灯电源以恒电流充电工作时必然有一最佳占空比与泵浦灯的内阻匹配,此状态下电源的最大电功率才能全部注入到泵浦灯上,这样能够使激光的输出功率达到最高。实验表明,泵浦灯电源最佳占空比为 9%,当选定重复频率为 45 Hz,脉宽为 2 ms,电源额定功率为 12 kW 时,测量激光输出功率与泵浦灯输入电压的关系曲线见图 9。

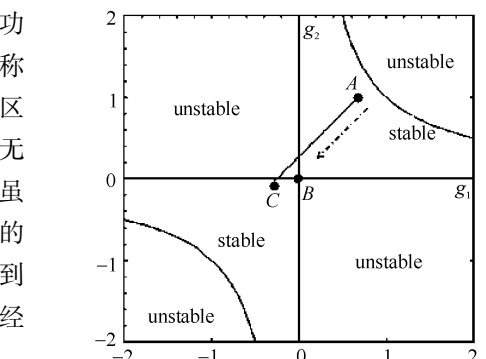


Fig. 8 Simulated G parameter

图 8 G 参数变化曲线

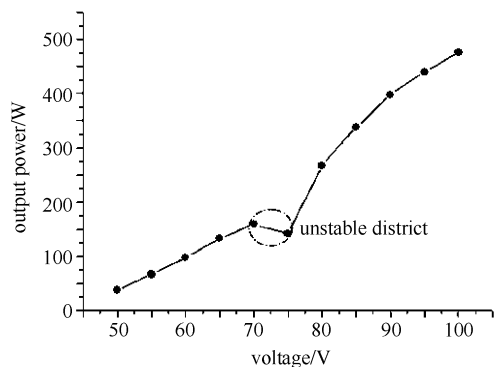


Fig. 9 Beam output power vs voltage of lamps

图 9 激光功率随电压变化关系

图 9 中的轮廓线圈起的区域表明激光器工作在非稳区,电压在 70~75 V 范围内变化时,功率有所下降,当电压大于 75 V 后,激光器又进入稳定区工作,随着泵浦灯功率的增加,激光功率继续增加,这与理论计算吻合。实验中还发现,当泵浦灯的电功率加至最大 12 kW 时,单位电压内激光功率的增加量并未出现明显减少,这说明还可以通过提高泵浦灯电源的额定功率以提高激光输出功率,这一点在理论计算中也有所体现,图 8 中 G 参数变化曲线表明当热焦距 $f=300$ mm 时, G 参数刚刚到达稳区点 C ,而稳区中还有较长的一段距离,这说明可继续增加泵浦灯的输入电功率,可以获得更高的激光功率输出,但是从图 7 看到,当热焦距 $f<300$ mm 后,光束参数积逐渐变大,即光束质量开始变差,因此,实现高功率的激光输出还得兼顾好的光束质量。

当泵浦灯输入电功率为 12 kW,选定重复频率 45 Hz,脉宽为 2 ms 时,激光平均功率最高,达 476 W。此时,在距离输出镜面 20 cm 和 120 cm 处获取的光斑如图 10 所示,小光斑直径为 3 mm,大光斑

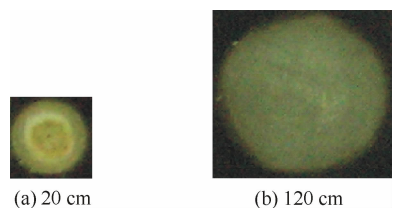


Fig. 10 Measured beam spot at different location

图 10 距离输出镜面不同处测量光束光斑

直径为 20 mm, 计算光束参数积为 $12.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。但此方法测算的结果较真值大, 实际真值要优于此结果。激光器可选用芯径 $d_{\text{core}} = 300 \mu\text{m}$ 的光纤进行传输, 其不稳定性优于 $\pm 1\%$ 。

对该固体激光进行试切割实验, 选定切割材料为不锈钢, 厚度 3 mm, 激光束经扩束后再聚焦, 聚焦镜焦距为 100 mm, 加工气体为压缩空气, 气压 0.6 MPa, 激光脉冲频率为 225 Hz, 脉宽为 0.4 ms, 功率 450 W, 切割速度 0.6 m/min, 获得的切缝宽度为 $250 \mu\text{m}$ 。当不锈钢厚度为 1.5 mm 时, 同等加工参数下, 切割速度可达 1.2 m/min, 切缝宽度仍为 $250 \mu\text{m}$ 。

3 结 论

本文利用非对称平凹谐振腔实现了高激光输出功率的同时得到高光束质量, 这是以牺牲 G 参数临界稳定区的部分区域为代价的, 但综合衡量, 光束参数积优于 $12.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 激光功率近 480 W, 电光效率近 4%, 芯径 $300 \mu\text{m}$ 的光纤传输稳定性优于 $\pm 1\%$, 切割性能优良。

参考文献:

- [1] Schlüter H. The long journey from idea to industrial success[C]//Proc of SPIE. 2008; **687402**.
- [2] Foster J D, Osterink L M. Thermal effects in Nd:YAG laser[J]. *J Appl Phys*, 1970, **41**:3656-3663.
- [3] Liu Xuesheng, Wang Zhiyong, Wu Qiang, et al. 500-W high average power, high beam quality Nd:YAG solid-state laser with one focusing reflector[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(7): 409-411.
- [4] 王宝华, 姜梦华, 惠勇凌, 等. 大功率固体激光器高效率光纤耦合[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 195-199. (Wang Baohua, Jiang Menghua, Hui Yongling, et al. Improving coupling efficiency of optical fiber for high power laser beam. *Chinese J Lasers*, 2008, **35**(2):195-199)
- [5] 吕百达. 激光光学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992: 264-269. (Lü Baida. Laser optics. Chengdu: Sichuan University Press, 1992: 264-269)
- [6] 张玲, 杨少辰, 刘欣, 等. 氪灯侧面泵浦 Nd:YAG 激光器热透镜效应研究[J]. 北方交通大学学报, 2002, **26**(3): 69-73. (Zhang Ling, Yang Shaochen, Liu Xin, et al. Study on thermal lens effect of Nd:YAG laser side pumped by Kr lamp. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2002, **26**(3): 69-73)
- [7] 李强, 王志敏, 王智勇, 等. 大功率连续 Nd:YAG 激光器热透镜焦距测量[J]. 中国激光, 2004, **31**(9): 1117-1120. (Li Qiang, Wang Zhimin, Wang Zhiyong, et al. Thermal lens focal length measurement of high power lamp pumped CW Nd:YAG laser. *Chinese J Lasers*, 2004, **31**(9): 1117-1120)
- [8] 巨养锋, 阮双深, 龙井华. 固体脉冲激光器输出镜最佳反射率的普遍表达式[J]. 光电子技术与信息, 2002, **15**(4):15-16. (Ju Yangfeng, Ruan Shuangshen, Long Jinghua. General expression of the optimum reflectivity of pulse-pumped solid-state laser. *Optoelectronic Technology and Information*, 2002, **15**(4): 15-16)

High power high beam quality Nd: YAG pulsed laser

Wang Baohua, Li Qiang, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this paper, the purpose of output pulsed laser with high-power and high beam quality is discussed, and the structure of unsymmetrical plane-concave resonator is analyzed theoretically. We have completed the laser, which could output high-power and high beam quality with single Nd:YAG rod pumped by double Xe-lamp and unsymmetrical plane-concave resonator. When the duty cycle was 9%, the average power of laser was nearly 480 W, beam parameters product was better than $12.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ and efficiency of electricity to light was nearly 4%, which matched the theoretical analysis well. The laser could be transmitted by optic fiber of $300 \mu\text{m}$ core diameter and its instability was less than $\pm 1\%$. Processing experiment has proved that it had good cutting quality.

Key words: pulsed solid laser; Nd:YAG; resonator; thermal focal length; beam quality