

文章编号: 1001-3806(2007)02-0144-03

全固态单模 Nd:YAG 激光器输出特性优化的实验研究

李斌成

(中国科学院 光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 为了实现高功率全固态激光器的高输出光束质量, 使用 1mm 直径 Nd:YAG 激光棒和单一二极管激光模块侧面抽运的简单激光腔设计来实现功率高于 10W、光束质量接近衍射极限的 TEM₀₀ 模输出。通过使用小口径激光棒抑制高阶模振荡、曲面后反镜和负透镜组合补偿热透镜效应和实验优化后反镜的曲率半径、负透镜的焦距以及激光腔腔长等结构参数使激光器输出功率和光束圆率同时达到最大, 实现了平均功率 10.8W、脉冲宽度 15ns、光斑圆率 98.8% ± 0.8%、M² 值为 1.1 的近衍射极限光束输出。结果表明, 通过使用小口径激光棒提高激光器输出光束质量工程上可行。

关键词: 激光器; 光束质量; 激光腔设计; 激光二极管侧面抽运

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Experimental optimization of the output performance of a all-solid-state pulsed Nd:YAG laser

LI Bin-cheng

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract A simple cavity design for a pulsed Nd:YAG laser employed a 1mm-diameter laser rod pumped by a single laser diode module was reported. An experiment was performed to optimize the cavity design to obtain a laser output of > 10W average power and a nearly diffraction-limited TEM₀₀ mode. In this design, the small-diameter laser rod was used to eliminate the oscillation of high-order transverse modes, and a combination of a curved rear mirror and a negative lens placed inside the cavity was employed to compensate the thermal lens effect inside the laser rod. By experimentally optimizing the values of curvature of the rear mirror, the focal length of the negative lens, and the cavity spacing to maximize simultaneously the output power and the beam circularity, the pulsed Nd:YAG laser reached an average power of 10.8W, a beam circularity of 98.8% ± 0.8%, and M² value of 1.1. The experimental results showed that in laser engineering the small-diameter laser rod could be used to improve the beam quality of high-power lasers.

Key words lasers; beam quality; laser cavity design; laser diode side-pumping

引 言

随着激光技术的发展, 高功率激光器在先进激光制造, 特别是激光微细加工领域得到了越来越广泛的应用^[1, 2]。同时, 激光微细加工也对所使用的激光器提出了越来越严格的技术要求: (1) 高光束质量, 要求 TEM₀₀ 模式运行, M² 值接近 1。接近衍射极限的激光束能使加工精度提高到微米甚至亚微米尺度; (2) 高平均输出功率, 输出功率至少在瓦级, 最好在几十瓦级; (3) 短脉冲宽度, 脉冲宽度越短, 激光束峰值功率越高, 和加工材料相互作用时的热影响区域越小, 加工精度越高; (4) 高重复频率, 在千赫兹以上。高的重复

频率有利于提高加工速度和产出率; (5) 使用寿命长, 免维修或维修次数少。作为工业激光器, 其性能必须稳定可靠, 达到长时间稳定工作要求; (6) 适用于工业制造环境。大功率二极管抽运的全固态激光器不仅能满足上述要求, 而且具有结构紧凑、体积小、效率高等优点, 在激光微细加工领域得到了广泛应用。高光束质量的高功率全固态激光器本身也成为近年来的研究热点, 输出功率不断提高^[3-8]。作者报道了一种采用单一二极管抽运模块的简单 Nd:YAG 激光器设计, 其主要性能指标均满足激光微细加工的技术要求, 且结构简单, 性能稳定, 可望在激光加工领域得到广泛应用。

1 激光腔设计

激光腔的结构如图 1 所示, 主要由激光棒及二极管抽运模块、负透镜、调 Q 开关 (由偏振片、Pockel 盒

作者简介: 李斌成 (1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光热技术和光学薄膜检测技术研究。

E-mail: bcl@ie.ac.cn

收稿日期: 2006-03-23 收到修改稿日期: 2006-04-03

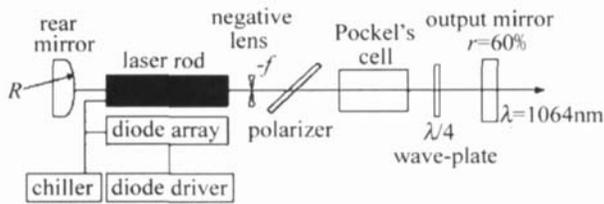


Fig 1 Schematic diagram of the laser cavity

和 $\lambda/4$ 波片组成)、及后反镜和输出镜组成。后反镜为反射率高于 99.9% 的曲面全反镜, 输出镜为透过率 40% 的平面镜。激光棒直径为 1mm, 长度 38mm, Nd 离子质量分数为 0.012。1mm 的激光棒口径抑制了激光腔内的高阶横模^[9], 保证了激光器的单横模 (TEM_{00}) 输出。和大多数侧面抽运设计不同, 采用单一二极管模块侧面抽运, 大大简化了该模块的设计及安装难度, 有利于提高激光器的性能稳定性, 减少激光器失效的概率。其缺点是抽运效率相对较低。为了达到 10W 以上的功率输出, 二极管模块的抽运光功率需要在 80W 以上, 对应的光-光转换效率为 12% 左右。激光棒与二极管抽运模块的具体结构如图 2 所示。激

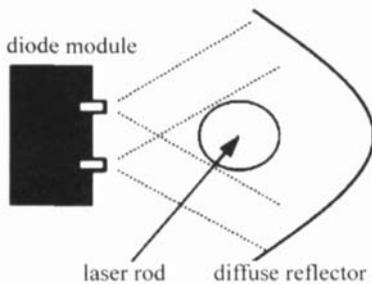


Fig 2 Pumping arrangement

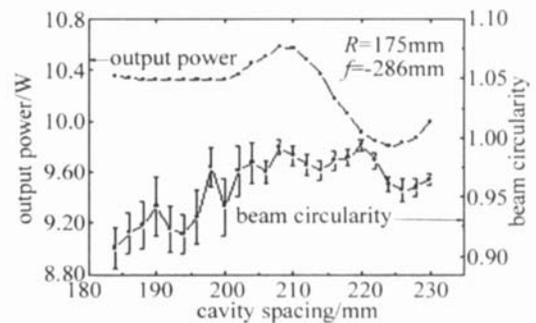
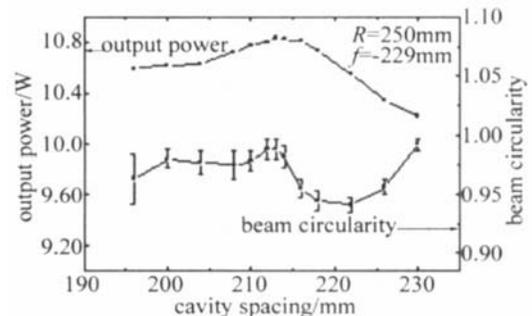
光二极管模块是 CEO LASER 公司的 120W 连续二极管阵列 (ARR01C120), 中心波长 808nm, 由两排二极管激光条组成, 排间距为 1.2mm。二极管激光条的横向发散角为 40°。激光棒与二极管激光条平行, 端面间距为 2mm 左右。在激光棒的另一侧放置一圆型漫反射体, 将二极管激光发出的光聚焦到激光棒内。通过仔细调节二极管抽运模块的指向和位置, 可使激光棒内抽运光强分布的均匀性达到 90% 以上。激光棒和二极管模块采用内循环水冷却。

2 结果及讨论

全固态激光器设计的主要是如何补偿激光棒中的热透镜效应。在本设计中采用曲面后反镜和负透镜组合补偿热透镜效应。通过实验优化曲面后反镜的曲率半径、负透镜的焦距以及激光腔腔长等参数达到最佳的激光器性能。激光器脉冲宽度由调 Q 开关确定, 设置为 15ns。实验中主要对激光器的输出功率和光束质量进行优化。首先设置二极管激光器电流使抽运光功率达到 85W, 然后通过调节冷却水温度改变二

极管激光模块的峰值波长, 以达到二极管激光发射谱和 Nd:YAG 激光棒吸收谱的最佳匹配。同时将重复频率设置为 10kHz, 然后使用不同曲率半径的后反镜和不同焦距的负透镜组合, 调节输出镜位置改变激光腔长, 测量不同腔长时的输出功率、光斑 (椭圆) 圆率及光束指向性漂移。当在某一腔长时输出功率和光斑圆率同时达到最大、且光束指向性漂移接近最小时可认为后反镜、负透镜和激光腔腔长实现了最佳组合。

当激光棒吸收的抽运光功率在 30W ~ 60W 之间时 (假设光腔的总耦合效率在 35% ~ 70% 之间), 仅考虑激光棒内的温度梯度, 理论计算^[9] 得出热透镜焦距在 50mm ~ 100mm 之间。因此, 实验中使用的后反镜曲率半径有: 150mm, 175mm, 200mm, 250mm, 而负透镜焦距包括 -203mm, -229mm, -250mm, -286mm。由此得到的组合负透镜焦距大致在 -55mm ~ -87mm 之间。实验中发现, 当使用后反镜曲率半径 175mm 和负透镜焦距 -286mm 组合, 腔长为 208mm ~ 210mm 时, 激光器性能达到最优, 而当使用曲率半径 250mm 和焦距 -229mm 组合, 腔长为 213mm 左右时, 激光器性能最优。使用其它的曲率半径和焦距组合时, 输出功率和光斑圆率在不同腔长位置达到最大。图 3 和图

Fig 3 Output power and beam circularity versus the cavity spacing for $R=175\text{mm}$ and $f=-286\text{mm}$ Fig 4 Output power and beam circularity versus the cavity spacing for $R=250\text{mm}$ and $f=-229\text{mm}$

4 分别是两种最佳组合的测量结果。在第 1 种组合时, 激光器的最大输出功率为 10.6W, 光斑圆率为 99.2% \pm 0.6%。在第 2 种组合时, 激光器的最大输出功率为 10.8W, 光斑圆率为 98.8% \pm 0.8%。在两种组合时光束指向性漂移均为 5 μ rad (发散角的 0.2%)

左右。实验结果显示,光束指向性漂移对后反镜曲率半径、负透镜焦距以及激光腔腔长等参数的变化不敏感,不同的组合时变化腔长从 190mm ~ 230mm 时,光束指向性漂移的变化范围为发散角的 0.15% ~ 0.25%。比较图 3和图 4中的结果发现,当使用曲率半径 250 mm 和焦距 - 229mm 组合时的输出功率更高,达到 10.8W。此时的光-光转换效率为 12.7%,而斜率转换效率为 29%。图 5是在后反镜曲率半径 250mm、负透镜焦距 - 229mm 和腔长 213mm 时输出光束的光强分布,接近理想的高斯分布。进一步测量激光束在 x 和 y 方向的 M^2 值均为 1.1 左右。

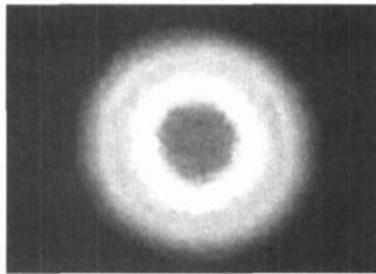


Fig 5 Intensity profile of the output beam

上述实验结果是在重复频率为 10kHz 时得到的。作者也测量了其它重复频率时的输出功率和光斑圆率,图 6显示了测量结果。可以看出,当重复频率在

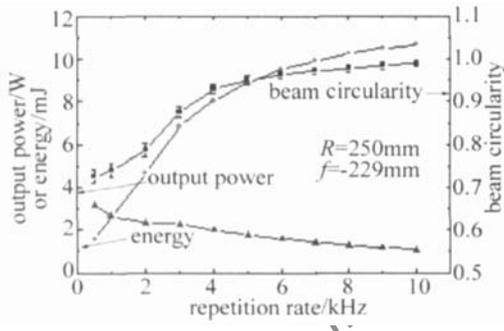


Fig 6 Output power, pulse energy and beam circularity versus the repetition rate for $R=250\text{mm}$ and $f=-229\text{mm}$

5kHz 以上时,光斑圆率仍达到 95% 以上。在 5kHz 时,输出功率为 8.9W。而在 4kHz 时,光束圆率仍有 93%,输出功率 8W。只有在重复频率低于 4kHz 时,激光器输出功率和光斑圆率才随着重复频率的降低而快速降低。从图中的结果也可以看出,激光束的单脉

冲能量随重复频率的降低而增加,在 10kHz 时,为 1.1mJ 4kHz 时,为 2.0mJ 而在 0.5kHz 时,达到了 3.2mJ。需要说明的是,单脉冲能量的增加提高了激光束的峰值功率密度,更容易造成激光腔中光学元件的损伤。因此,本设计不适合激光器工作在 4kHz 之下。

3 结 论

采用 1mm 直径激光棒抑制高阶横模振荡和单一二极管激光模块侧面抽运的简单结构,通过使用曲面后反镜和负透镜组合补偿热透镜效应,实现了功率高于 10W、光束质量接近衍射极限的 TEM_{00} 模光束输出。在此设计的基础上,对高于 10W 的输出光束进一步放大,实现了高于 30W 的单横模输出,光斑圆率优于 95%, $M^2 < 1.2$ 。同时,对 1064nm 的光束实现了二倍频和三倍频单横模输出,在 532nm 和 355nm 波长的输出功率在无放大级时,分别达到了 5W 和 3.3W,加放大级时,达到了 15W 和 10W,光斑圆率优于 90%。

参 考 文 献

- [1] GOWER M G. Industrial application of laser micromachining [J]. *Optics Express* 2000, 7(2): 56~67.
- [2] BOOTH H J. Recent applications of pulsed lasers in advanced materials processing [J]. *Thin Solid Films* 2004, 453~454: 450~457.
- [3] LIU Y Y, FANG G Zh, LIU B *et al*. Laser diode side-pumped CW Nd:YAG lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2003, 30(7): 577~580 (in Chinese).
- [4] ZHAO Zh M, LIL, TIAN F *et al*. High power end-pumped intracavity frequency doubling Watt-level green laser [J]. *Laser Technology* 2003, 27(4): 331~333 (in Chinese).
- [5] XU D G, YAO J Q, CHEN J *et al*. High-stabilization 85W all-solid-state green laser operation [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2004, 31(4): 385~389 (in Chinese).
- [6] LIL, YANG S H, SUN W F *et al*. LD-pumped Yb:YAG chip laser with high beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2004, 31(11): 1285~1288 (in Chinese).
- [7] HU Ch H, BI Y, SUN Zh P *et al*. Laser-diode pumped 500W continuous-wave Nd:YAG laser [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2005, 32(1): 13~15 (in Chinese).
- [8] GAO Q S, TONG L X, JIANG J F *et al*. The four-pass pumped coupling system of the high power diode lasers stack [J]. *Laser Technology* 2005, 29(2): 135~137 (in Chinese).
- [9] KOECHNER W. *Solid-state laser engineering* [M]. Berlin: Springer, 1999. 195~236, 406~441.
- [10] ZHANG X D, BAO Zh N. Non-stationary signal processing and conduction [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 20~26 (in Chinese).

(上接第 119 页)

- [8] GRENEKER E F, SYLVESTER V B. Use of the envelope detection method to detect micro-Doppler [J]. *SPIE* 2003, 5077: 167~174.
- [9] CHEN V C, LIPPS R D. Time frequency signatures of micro-Doppler

phenomenon for feature extraction [J]. *SPIE* 2000, 4056: 220~226.

- [10] ZHANG X D, BAO Zh N. Non-stationary signal processing and conduction [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 20~26 (in Chinese).