

文章编号: 0258-7025(2009)01-0047-04

耦合系统的成像质量对端面抽运 固体激光器的影响

亓 岩¹ 官武鹏¹ 李 欢^{2,3} 颜博霞¹ 房 涛¹ 郑 光¹ 梅东滨¹ 毕 勇¹

¹ 中国科学院光电研究院, 北京 100085
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
³ 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 耦合光学系统是端面抽运固体激光器中不可缺少的部分,其成像质量的优劣直接影响到激光器转换效率的高低。以激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄/LBO 457 nm 蓝光激光器为例,分别采用两种不同结构的准直聚焦透镜组合作为耦合光学系统,分析其对抽运光的成像情况以及对端面抽运固体激光器光束质量和输出功率的影响,在激光器的抽运功率和谐振腔的参数完全相同的情况下,改进的四片式耦合光学系统使激光器输出的光束质量得到了明显改善,同时极大地提高了倍频输出功率,在 30 W 的抽运功率下,得到了 4.3 W 的连续 457 nm 蓝光激光输出,光-光转换效率达到 13.7%。

关键词 激光器;固体激光器;耦合系统;倍频;蓝光

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093601.0047

Effects of Aberrations of Coupling Systems on the End-Pumped Solid-State Lasers

Qi Yan¹ Gong Wupeng¹ Li Huan^{2,3} Yan Boxia¹
Fang Tao¹ Zheng Guang¹ Mei Dongbin¹ Bi Yong¹

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
²State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Coupling systems are the key elements in end-pumped solid-state lasers, the aberrations of which greatly affect the efficiency of the lasers. A laser diode (LD) end-pumped Nd:YVO₄/LBO blue laser at 457 nm was taken as an example, the effects of aberrations of different coupling systems on the beam quality and the output power of the end-pumped solid-state laser were analyzed. At the same incident pump power and the same cavity parameter, the beam quality and the output power were greatly improved using the improved coupling system, at incident pump power of 30 W, continuous-wave output power of 4.3 W at 457 nm was achieved, the optical-to-optical conversion efficiency was 13.7%.

Key words lasers; solid-state lasers; coupling systems; frequency doubling; blue lasers

1 引 言

在大功率端面抽运固体激光器中,通常采用高

功率激光二极管(LD)阵列模块作为抽运源,抽运模块产生的光由具有一定直径和数值孔径的光纤输

收稿日期:2008-01-28;收到修改稿日期:2008-05-08

基金项目:国家 863 计划(2006AA030103),激光显示技术奥运应用演示验证(O60203A01Y)和激光显示奥运应用联合科技攻关(2006BAK12B13)资助项目。

作者简介:亓 岩(1980—),女,工程师,硕士,主要从事固体激光技术及大屏幕激光显示技术的研究。

E-mail:qiyan@aoe.ac.cn

出,通过光学耦合系统准直聚焦后,成为大小适合的光斑,入射到激光晶体中^[1~3]。在理想的耦合光学系统中,光纤每一点发出的光经过准直和聚焦后仍然是一个点,实际上由于光学系统的成像均具有一定的孔径和视场,对不同孔径和视场的入射光线,其成像的位置和倍率不同,会产生各种性质不同的像差^[4],以 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 457 nm 蓝光激光器^[5,6]为例,分析耦合系统的像差对其输出功率的影响。

2 实验装置及结果分析

实验装置^[7,8]如图 1 所示,工作物质采用 α 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体,掺杂原子数分数为 0.1%,尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm,其左端镀 808 nm 增透,914 nm 高反膜作为一个腔镜,右端对 1342 nm,1064 nm,808 nm 和 914 nm 增透,折叠输出镜 M_1 凹面的曲率半径为 50 mm,凹面镀 914 nm 高反,457 nm,1064 nm 和 1342 nm 增透膜,平面对 457 nm 增透,端镜 M_2 凹面的曲率半径为 200 mm,凹面镀 914/457 nm 双色高反膜,采用 3 mm × 3 mm × 15 mm 的 I 类临界相位匹配 LBO ($\theta = 90^\circ, \phi = 21.7^\circ$) 作为倍频晶体,两面镀 914/457 nm 增透膜,第一分臂 L_1 长 71 mm,第二分臂 L_2 长 40 mm。

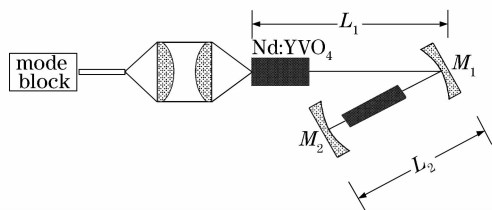


图 1 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 457 nm 蓝光激光器
实验装置

Fig. 1 Experimental setup of LD end-pumped Nd:YVO₄
457 nm blue laser

抽运模块采用中心发射波长为 808 nm 的 LD 阵列,经过芯径 0.4 mm,数值孔径 (NA) 为 0.22 的光纤,耦合输出 30 W 的抽运光,通过光学耦合系统准直聚焦后注入到 Nd:YVO₄ 中,选用成像比例为 1:1 的耦合光学系统。首先采用由两片结构完全相同的平凸透镜构成的两片式耦合系统,平凸透镜材料为 BK7 玻璃 ($n = 1.5163(808 \text{ nm})$),凸面曲率半径 $R = 5.18 \text{ mm}$,中心厚度 $t_c = 4.5 \text{ mm}$,焦距 $f = 10 \text{ mm}$,孔径 $\Phi = 9.5 \text{ mm}$,每片透镜的表面都镀有 808 nm 增透膜。两片透镜如图 2 所示,两凸面相对放置,光纤出光口置于组合透镜的焦点处,由光纤出

射的抽运光经第一片透镜准直后,经第二片透镜聚焦成抽运光斑入射到 Nd:YVO₄ 晶体中。

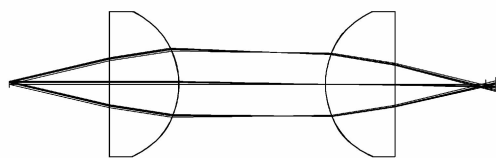


图 2 两片式耦合光学系统

Fig. 2 Coupling system of couple lenses

仔细调节激光腔镜以及晶体的位置和角度,同时用 TEC 致冷片精确控制抽运源和晶体的温度,得到 2.0 W 的 457 nm 蓝光输出,光-光转换效率仅为 6.7%。保持图 1 中其他元件位置不动,将端镜 M_2 换为具有同样曲率半径的平凹镜,其平面对 914 nm 增透,凹面对 914 nm 的透过率为 5%,同时去掉 LBO,保持谐振腔的参数不变,通过仔细调节,得到 7.8 W 的 914 nm 基频输出。值得注意的是,在将 LBO 晶体移出谐振腔之后,谐振腔的长度应做出相应的调整^[9,10],即将腔长减小 $\Delta = L_{\text{LBO}}[1 - (1/n_{\text{LBO}})]$,以保持谐振腔的参数不变。由实验结果可知,尽管基频输出功率很高,但由于光束质量很差,不能得到高效输出的蓝光。

用 ZEMAX 光学设计软件对两片式耦合光学系统对抽运光的成像进行分析,得到如图 3 所示的点列图^[11]。

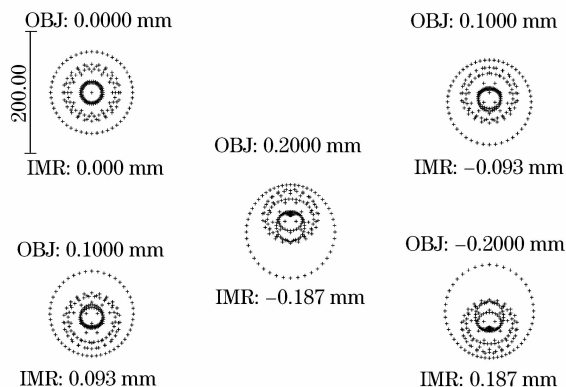


图 3 两片式耦合光学系统点列图

Fig. 3 Spot diagram for coupling system of
couple lenses

由点列图可见,系统存在严重的像差,这些像差使得抽运光的波前发生畸变^[12],导致光强的分布发生变化,光束的功率密度变低,光束质量变差;通过 ZEMAX 点列图也可以看到抽运光的分布很不均匀,均方根 (RMS) 半径较大,同时,由于像差的存在,抽运光和激光谐振腔的模式不能完全匹配,导致输出激光功率较低,光束质量差。

由于单透镜本身不能校正球差,而单正透镜产生负球差,单负透镜产生正球差,为了改善两片式耦合透镜组的球差,采用正负透镜的组合来代替原来的单片透镜以达到校正球差的目的^[13]。如图 4 所示,光纤出射的光经第一正负透镜组准直后,经第二正负透镜组进行聚焦。利用 ZEMAX 对组成每个正负透镜组合的四个面的曲率半径、透镜厚度以及空气间隔等参数进行优化设计,以减小其他种类的像差,经优化设计后的每组透镜组合由一片平凹镜和一片双凸镜组成,平凹镜的凹面曲率半径为 9.3 mm,双凸镜的两面的曲率半径分别为 18.4 mm 和 9.5 mm,透镜材料均为 BK7 玻璃,每片透镜的表面都镀有 808 nm 增透膜,各片透镜的放置如图 4 所示。

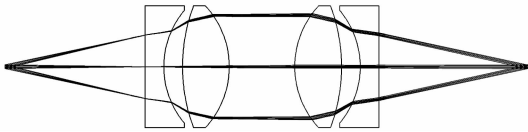


图 4 改进后的四片式耦合光学系统

Fig. 4 Improved coupling system of four lenses

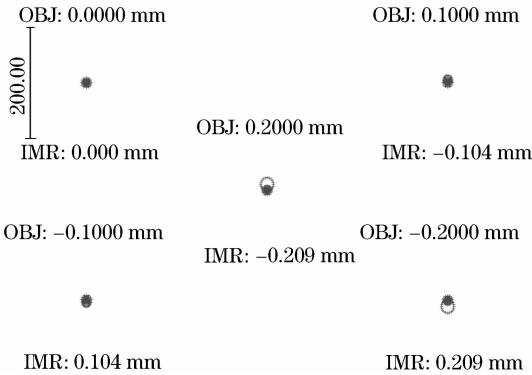


图 5 四片式耦合光学系统点列图

Fig. 5 Spot diagram for coupling system of four lenses

由 ZEMAX 光学设计软件,对优化设计后的四片式耦合光学系统对抽运光的成像进行分析,得到如图 5 所示的点列图。

由图 5 可以看出,光纤耦合系统的像差得到了校正,抽运光分布的均匀性得到了很大改善,各视场的 RMS 半径均控制在 10 μm 以内,抽运能量的分布更加集中,抽运光斑的大小能够满足激光谐振腔模式匹配的要求。

保持图 1 实验装置中激光器谐振腔的腔长和腔内各元件的位置不变,抽运源和晶体的温度也保持不变,仅仅更换光纤耦合透镜组,通过仔细调节,在同样的抽运功率下,基频光的输出功率达到 8 W,倍频实验得到了 4.3 W 连续 457 nm 的蓝光输出,光-光

转换效率达到 13.7%。图 6 给出了采用不同的耦合透镜时蓝光输出功率的比较,其各自的光斑形状如图 7 所示。可以看出,与采用两片式耦合透镜组相比,优化设计后的四片式耦合光学系统极大地提高了激光器的输出功率,输出激光的光束质量也得到明显的改善。

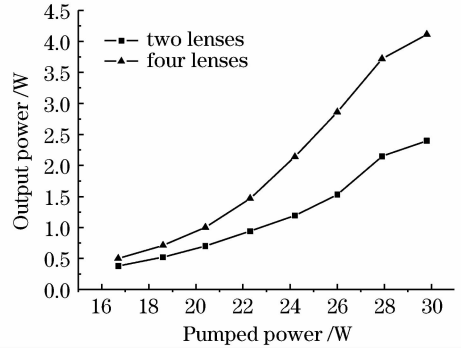


图 6 使用不同耦合光学系统的激光器输出功率

Fig. 6 Output power of lasers at different coupling systems

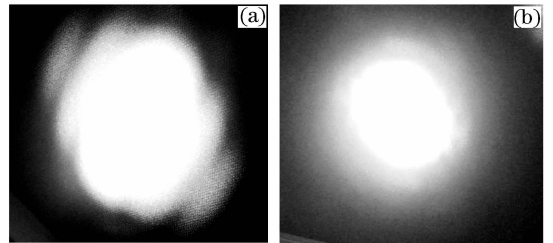


图 7 使用不同耦合光学系统的光斑形状 (a) 两片式; (b) 四片式

Fig. 7 Spot of different coupling systems (a) couple lenses; (b) four lenses

3 结 论

以 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 457 nm 蓝光激光器为例,分析了耦合系统的像差对其输出功率的影响。可以看出,光学耦合系统的像差对基频光的功率影响不是很大,但其是决定光束质量优劣的关键,通过减小光纤光学耦合系统的像差,可以使抽运光的分布更均匀,抽运能量更集中,增强抽运光和激光谐振腔的模式匹配,改善其输出激光的光束质量,极大地提高激光器的倍频输出功率。该方法适用于所有大功率端面抽运固体激光器的光纤光学耦合系统。

参 考 文 献

1 Rui Zhou, Zhiqiang Cai, Wuqi Wen *et al.*. High-power continuous-wave Nd:YAG laser at 946 nm and intracavity frequency-doubling with a compact three-element cavity [J].

- Opt. Commun.*, 2005, **255**:304~308
- 2 Shaojun Zhang, Qingpu Wang, Xiangang Xu *et al.*. Diode-laser pumped passively Q-switched green laser by intracavity frequency-doubling with periodically poled LiNbO₃ [J]. *Optics & Laser Technol.*, 2003, **35**:233~235
 - 3 Hou Wei, Zhang Hengli, Li Jian *et al.*. CW laser by intracavity frequency doubling with LBO in a LD pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4):437~439
侯 玮, 张恒利, 李 健 等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄/LBO 腔内倍频 5.3 W 连续波激光器 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(4):437~439
 - 4 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical Optics • Aberrations • Optical Design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2004. 93~101
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学 象差 光学设计 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004. 93~101
 - 5 Wang Junying, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. 1.1 W CW output, all-solid-stated blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):523~526
王军营, 郑 权, 薛庆华 等. 1.1 W 连续输出 473 nm 全固态蓝光激光器 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):523~526
 - 6 Qinghua Xue, Yikun Bu, Fuqiang Jia *et al.*. Compact efficient 1.5 W continuous wave Nd:YVO₄/LBO blue laser at 457 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **258**:67~71
 - 7 Fuqiang Jia, Qinghua Xue, Quan Zheng *et al.*. 2.41 W compact efficient CW blue light generation by intra-cavity frequency doubling of a compact Nd:YAG laser [J]. *Optics & Laser Technol.*, 2007, **39**:1081~1083
 - 8 Shi Zhaohui, Fan Zhongwei, Wang Peifeng *et al.*. High efficiency continuous-wave laser-diode-end-pumped vanadate laser operating on 914 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3):328~332
石朝辉, 樊仲维, 王培峰 等. 高效率连续波运转的激光二极管端面抽运 914 nm Nd:YVO₄ 激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):328~332
 - 9 F. Jia, Q. Xue, Q. Zheng *et al.*. 5. 3W deep-blue light generation by intra-cavity frequency doubling of Nd:GdVO₄ [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**:245~247
 - 10 Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu *et al.*. High-power efficient diode-pumped Nd:YVO₄/LiB₃O₅ 457 nm blue laser with 4.6 W of output power [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(8):1070~1072
 - 11 Joseph M. Gerry. Introduction to Lens Design with Practical Zemax Examples [M]. USA: Willmann-Bell Inc, 2002. 64~65
 - 12 Ji Xiaoling, Lü Baida. Effect of spherically aberrated lens on the quality of super-Gaussian beams [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(3):192~195
季小玲, 吕百达. 球差透镜对超高斯光束质量影响的研究 [J]. *激光技术*, 2001, **25**(3):192~195
 - 13 Xiao Zexin, An Liansheng. Engineering Optical Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 25~29
萧泽新, 安连生. 工程光学设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 25~29