

86 W 准基模激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器

刘永刚 王宝华 侯 玮 林学春 李晋闽

(中国科学院半导体研究所全固态光源实验室, 北京 100083)

摘要 报道了一种 86 W 准基模的激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器。所用激光晶体直径为 3 mm, 长度为 65 mm, 抽运方式为三维侧泵。通过凸面镜增大模体积, 采用双棒串接插入 90° 旋光片的方法补偿热致双折射, 通过计算和实验相结合的办法得到较优化的谐振腔参数, 并分析了谐振腔长度和激光模块之间的距离对稳区的影响; 得到最高功率 86 W, $M^2 < 2$ 的准基模激光输出。数值计算了径向和切向偏振模式的半径随热透镜焦距的变化。数值计算了激光器的输出参数, 与实验结果进行了比较。设计了较优化的扩束聚焦系统, 分析了经过扩束聚焦系统后激光束腰位置波动随抽运功率的变化规律。

关键词 激光器; 高光束质量; 热退偏补偿; 侧面抽运

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.071403

Side-Pumped Nd:YAG Laser of 86 W Quasi-Fundamental Mode Diode-Lasers

Liu Yonggang Wang Baohua Hou Wei Lin Xuechun Li Jinmin

(Laboratory of All Solid State Lasers, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100083, China)

Abstract Side-pumped Nd:YAG lasers of 86 W quasi-fundamental mode diode-lasers is presented. In experiment, the Nd:YAG crystal with the dimensions of is side-pumped by diode-lasers from three directions. Convex mirrors are used to increase mode volume with a 90° rotator to compensate thermal depolarization. Right parameters of cavity are acquired by experiments and stimulations. At last, the maximum output power of 86 W is achieved with $M^2 < 2$. The changes of beam width of radia l and tangential polarization with the length of thermal lens are stimulated. Parameters of the laser are numerical calculated, which are in good agreement with the experimental results. right expanding and focusing system are designed, and the relationship between the laser beam waist position and input current is acquired.

Key words lasers; high beam quality; thermal depolarization compensation; side-pumped

OCIS codes 140.3410; 140.3480; 140.3580

1 引 言

高功率高光束质量激光器在军民领域都有极其广泛、重要的应用, 因而成为当前激光技术领域的研究热点之一。利用激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 晶体棒是获得高功率的主要技术方案之一, 具有结构简单, 效率高等优点、但其缺点是比较难以获得高的光束质量。国际上美国、日本等多家研究单位都从事该方面的研究工作, 并取得了比较好的结果^[1,2], 已获得百瓦级基模激光输出。国内浙江大学^[3]等也在进行该方

收稿日期: 2011-03-03; 收到修改稿日期: 2011-04-01; 网络出版日期: 2011-05-06

基金项目: 国家 863 计划(2008AA030116)和国家 973 计划(2010CB933800)资助课题。

作者简介: 刘永刚(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率高光束质量全固态激光器方面的研究。

E-mail: ygliu@semi.ac.cn

导师简介: 林学春(1978—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态激光器及其工业应用等方面的研究。

E-mail: xclin@semi.ac.cn

面的研究,但与国际水平具有一定的差距,获得 61 W 的准基模输出。限制获得高功率高光束质量的主要原因是由于激光晶体中废热的存在,废热导致热透镜、热致双折射等不良效应。废热引起的应力导致激光棒相当于双焦透镜,其径向和切向的辐射具有不同的焦距。入射到晶体的线偏振波或非偏振波总会存在径向 γ 和切向 ϕ 的两个分量,意味着径向和切向偏振光的热透镜效应不能同时补偿,而稳定的低阶模只有在径向和切向 ϕ 偏振稳区重合的情况下才能够得到^[2]。所以必须设法消除或补偿热致双折射效应,采用 LD 抽运大大减轻了固体激光器中的无用热,但是并没有完全消除。为了获得高的光束质量,必须采取补偿措施。本文在采用双棒串接补偿热致双折射的基础上优化谐振腔结构,最终得到了较好的结果。

2 实验装置与结果分析

激光器的输出功率最终受制于输入功率,为了输出高的功率要保证激光器在高的电流下仍处于稳定区,同时为了获得高的光束质量,要同时让模体积尽可能的大,而在整个稳区范围内,如果基模尺寸过大,则稳区会很窄^[4],而窄的稳区不可能获得高的功率。综合各种因素和模拟计算得出如图 1 所示的谐振腔配置。

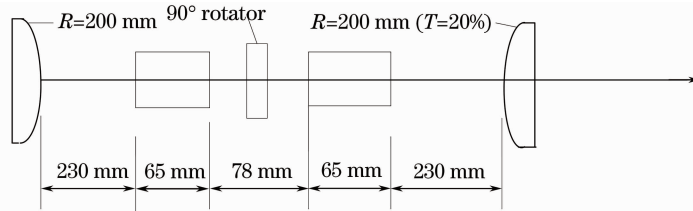


图 1 激光器结构示意图

Fig. 1 Configuration of laser system

数值计算表明,增大腔镜和激光头的距离会使谐振腔的稳区向低电流方向移动,但稳区大小不变。增大两个激光头之间的距离会导致两个稳区之间的非稳区范围变大。实验中采用的激光晶体长度 $L=65$ mm,直径 $d=3$ mm,最高电流 30 A 时的激光二极管阵列(LDA)输出功率为 300 W。因为采用的激光头为三维抽运,均匀性肯定不是很好,因此把其中一个激光头的左右对调,这样均匀性会好些^[5],图 2 灰色和白色填充的矩形分别为第一个和第二个激光头中 LDA 的分布示意图。

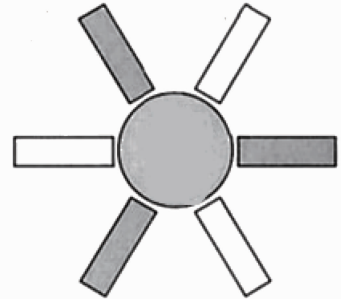


图 2 LDA 反向放置

Fig. 2 LDA place reverse

两个激光棒之间的 90° 石英旋光片使激光的径向和切向分量的偏振方向都旋转 90° ,在第一个激光棒中成径向偏振的模式,在第二个激光棒中就变成切向的,假如光束通过两个棒的区域相同,则在第一个棒中径向和切向产生的相位延迟被第二个棒抵消,由此实现了

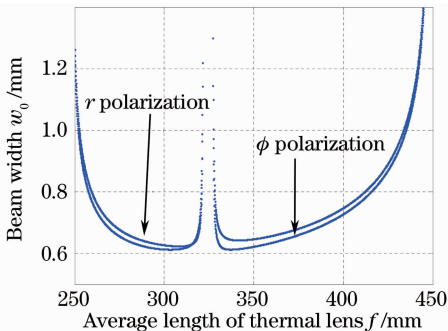


图 3 激光晶体内部径向和切向偏振束宽随平均热透镜焦距的变化

Fig. 3 r and ϕ -polarization beam width as a function of average length of thermal lens

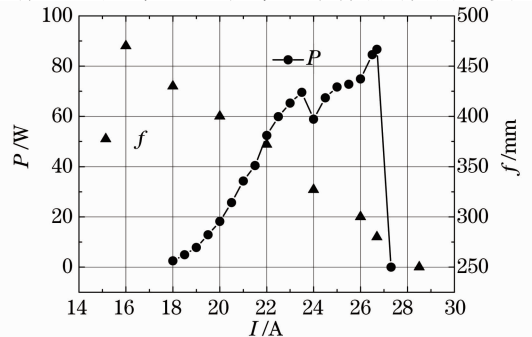


图 4 1064 nm 激光输出功率和平均热透镜焦距与抽运电流的关系

Fig. 4 1064 nm laser output power and average length of thermal lens as a function of pumping current

双折射补偿^[6]。假设在完全补偿的情况下激光晶体内基模光束尺寸随平均激光晶体平均热透镜焦距的变化如图 3 所示。

从图 3 可以看出完全补偿热致双折射的情况下,径向和切向偏振光的稳区变得完全重合,稳区的边缘两种偏振光斑尺寸非常接近,这样就能够获得较好的光束质量。还可以看出,在激光晶体热透镜平均焦距小于 250 mm 和 325 mm 左右时激光器会进入非稳区,而从图 4 看出,激光器在激光晶体热透镜焦距 250~270 mm 时激光器功率也为零,这是由于基模体积变的足够大后,激光器变得不稳定,导致提前进入非稳区。

用 ABCD 矩阵计算出谐振腔内外的基模光束尺寸如图 5 所示。

图 5 为假设热致双折射完全补偿的情况下计算出的,但从图中可以看出每一种偏振模式在两个激光头中的光束大小并不完全一致,也就导致了不能完全补偿,虽然在两个激光头之间可以插入 4f 成像系统达到光束大小的完全一致,但是这无疑会增加谐振腔的长度,同时还会引入额外的损耗和像差,也使激光器的不稳定因素增加。此时激光棒中基模光束最大半径为 0.7153 mm,根据自孔径限模条件^[7]: $\phi/2 \ll 2w \ll 2\phi/3$, 对于直径 $d=3$ mm 的激光晶体,最大可以允许的激光束半径为 1 mm,对于 1 mm 半径光束的激光输出光束质量 $M^2 = \left(\frac{1}{0.7153}\right)^2 = 1.954$,图 6 和图 7 分别为实际测得的光斑和光束质量的数据。

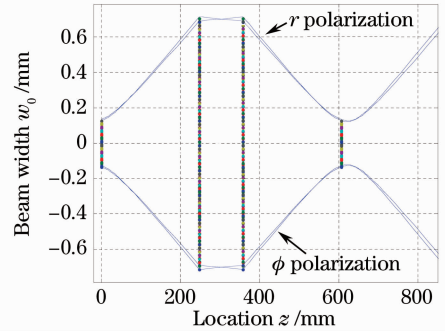


图 5 腔内外切向和径向基模偏振光束分布示意图
Fig. 5 Schematic of distribute of r and ϕ polarization in and out cavity

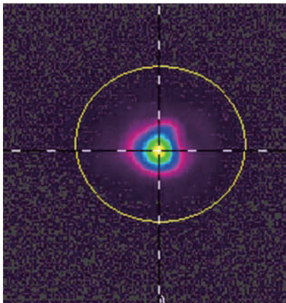


图 6 最高功率下的光斑

Fig. 6 Shape of laser beam under the highest output power

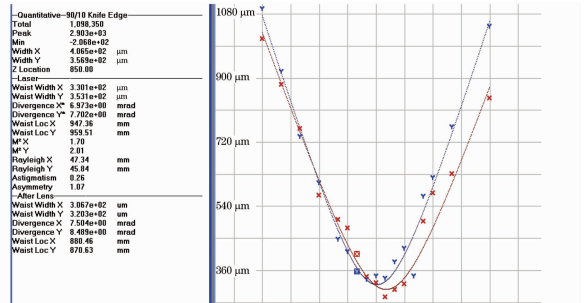


图 7 光束质量测试结果

Fig. 7 Result of beam quality measured

理论计算和最终实验测出的激光参数比较见表 1。从表 1 可以看出理论计算和实测的激光参数非常接近,证明补偿效果较好。

表 1 计算和实验结果的对比

Table 1 Comparison of calculated results and experimental results

	Beam waist w_0 /mm	Diverging angle θ /mrad
Calculation results ($M^2 = 1.954$) γ polarization	0.1692	3.912
Calculation results ($M^2 = 1.954$) ϕ polarization	0.1763	3.756
Experimental results ($M^2 = 2$)	0.1766	3.851

此谐振腔输出光的束腰位置会随着电流的变化而变化,但是用于加工的激光器为了获得小的焦点,一般是先把激光扩束,然后再聚焦,虽然输出镜后的束腰变化很大,只要采用合适的扩束聚焦系统仍然可以把束腰位置变化控制在很小的范围之内。为此采用图 8 所示的扩束聚焦系统。经过扩束聚焦系统后的束腰位置变化图像如图 9 所示。

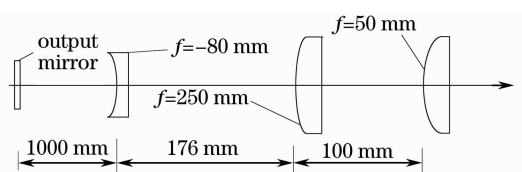


图 8 扩束聚焦光路

Fig. 8 Optical configurations of expanding and focusing

经过扩束聚焦后束腰位置非常稳定,在整个电流范围内波动幅度只有 $9\ \mu\text{m}$,而在整个功率范围内激光的焦深大小范围为 $35\sim 100\ \mu\text{m}$,束腰位置的漂移远小于激光焦深。

3 结 论

利用两个全国产 LD 三维侧面抽运激光模块腔内串接,采用凸面反射镜增大模体积,插入 90° 旋光片对热致双折射补偿的方法得到最大功率 $86\ \text{W}$, $M^2 < 2$ 的高光束质量输出。实际测得的激光光束参数和理论计算的符合,证明了此谐振腔配置的双折射补偿的效果相当好。理论计算结果表明,虽然输出激光束腰位置波动很大,但只要选用合适的扩束聚焦系统就能够使束腰位置波动远小于激光的焦深,完全能够满足实际应用。

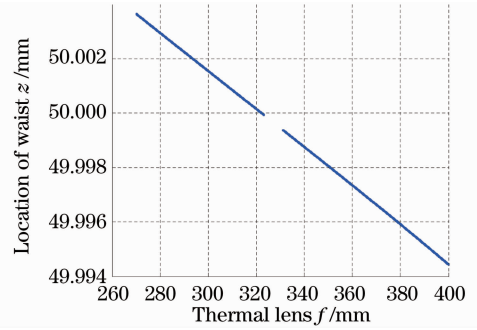


图 9 束腰位置随热透镜焦距的变化
Fig. 9 Location of beam waist varying with the length of thermal lens

参 考 文 献

- 1 Y. Hirano, Y. Koyata, S. Yamamoto, K. Kasahara *et al.*. 208-W TEM₀₀ operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10): 679~681
- 2 Susumu Konno, Shuuichi Fujikawa, Koji Yasui. Efficient 153 W cw TEM₀₀ mode 1064-nm generated by a laser-diode-pumped Nd:YAG rod laser[C]. *OSA Advanced Solid-State Lasers*, 2001, **50**: 11~14
- 3 Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen *et al.*. Thermal-induced birefringence compensated laser system with two Nd:YAG rods[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1483~1487
- 刘 崇, 葛剑虹, 项 震 等. 双棒串接补偿热致双折射效应激光谐振腔[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1483~1487
- 4 G. Cerullo, S. Desilvestri, V. Magni *et al.*. Output power limitations in CW single transverse mode Nd:YAG lasers with a rod of large cross-section[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 1993, **25**(8): 489~500
- 5 Martin Ostermeyer, Guido Klemz, Philipp Kubina *et al.*. Quasi-continuous-wave birefringence-compensated single- and double-rod Nd:YAG lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(36): 7573~7582
- 6 Walter Koechner: *Solid-State Laser Engineering*[M]. Sixth Ed., Berlin: Springer, 2006. 373~375
- 7 Lü Baida. *Solid Laser Elements*[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002. 123~133
- 吕百达. *固体激光器件*[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 123~133