

文章编号: 1001-3806(2009)02-0166-03

LD 端面抽运 Nd:YAP 1341.4nm 激光器

段延敏^{1,2}, 李爱红¹, 朱海永¹, 张戈^{1*}, 黄呈辉¹, 魏勇¹, 黄凌雄¹, 邱怡申²

(1. 中国科学院 福建物质结构研究所, 福州 350002; 2. 福建师范大学 物理与光电信息科技学院, 福州 350007)

摘要: 为了研究 Nd:YAP 晶体在 LD 端面抽运中的 1341.4nm 激光输出特性, 采用理论计算和实验测量了实验系统的热焦距, 对比了平平腔和平凹腔激光输出结果。采用输出耦合率为 $T=2.4\%$ 的平凹腔和输出耦合率为 $T=2.6\%$ 的平平腔, 分别得到了 3.15W 和 2.86W 的 1341.4nm 线偏振激光输出, 对应斜效率分别为 18.4% 和 17.5%。结果表明, Nd:YAP 作为 1.3 μm 波段激光晶体具有潜在的优点。

关键词: 激光器; 近红外; 端面抽运; Nd:YAP

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

LD end-pumped 1341.4nm Nd:YAP laser

DUAN Yan-min^{1,2}, LI Ai-hong¹, ZHU Hai-yong¹, ZHANG Ge¹, HUANG Cheng-hui¹,
WEI Yong¹, HUANG Ling-xiong¹, QIU Yi-shen²

(1. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China; 2. School of Physics and Opto-Electronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to study the output characteristics of diode-end-pumped Nd:YAP laser operating at 1341.4nm, the thermal focal lengths of end-pumped Nd:YAP laser were calculated and measured, and the output results of lasers with plane-plane and plano-concave resonators were compared respectively. Making use of plane-concave resonator with the coupler transmission of 2.4% and plane-plane cavity with the coupler transmission of 2.6%, 3.15W and 2.86W linearly polarized laser radiation at 1341.4 nm were obtained, respectively, corresponding optical slope efficiency of 18.4% and 17.5%. The results show that Nd:YAP laser crystal owns the potential advantages on 1.3 μm laser.

Key words: lasers; near infrared; end-pumped; Nd:YAP

引言

1.3 μm 波段的激光由于其独特的光谱特点, 在大气环境检测、激光显示和激光医疗等领域存在潜在的应用价值, 而日益受到人们的重视^[1-3]。获得 1.3 μm 波段激光的主要途径是通过抽运各种掺钕激光晶体, 由⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2}能级跃迁产生。目前, 用于获得 1.3 μm 波段的激光晶体主要有 Nd:YAP, Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF, Nd:KGW 等。对比各晶体的⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2}跃迁, Nd:YVO₄ 具有最大的跃迁截面, 而较小的热导率限制了其在高功率抽运下的使用, 在作为 1.3 μm 波段中小功率的激光晶体上具有优势^[4]。Nd:KGW 是一种新型激光晶体, 具有可掺杂浓度高的优点, 但目前晶体生长技术还不够成熟^[5]。Nd:YAP 不但具有可与 Nd:YAG

相比拟的较高热导率和光学机械系数, 而且其⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2}跃迁的跃迁截面仅次于 Nd:YVO₄, 是 Nd:YAG, Nd:YLF 等晶体同一跃迁受激发射截面的 2.4 倍以上^[6], 所以其在 1.3 μm 波段的激光的应用被人们所重视。并且同 Nd:YVO₄ 一样是光学各向异性晶体, 线偏振输出, 在非线性和频率变换等场合, 不仅避免了插入偏振片带来的损耗, 还使器件的结构更加紧凑。

文献[7]中利用 LD 侧面抽运 Nd:YAP, 获得了 122W 的连续 1341.4nm 激光输出。而采用 LD 端面抽运虽然输出功率不如侧面抽运, 但具有体积小、可靠性高、抽运效率高及激光光束质量好等优点。目前对 Nd:YAG, Nd:YVO₄ 等晶体端面抽运的实验报道较多, 而利用 Nd:YAP 晶体进行端抽运的实验国内还未见报道, 鉴于在高功率 1.3 μm 波段获得了较好的输出结果^[8], 所以采用 LD 端面抽运 Nd:YAP 晶体进行 1.3 μm 连续激光实验。本文中报道了采用 LD 端面抽运 Nd:YAP 实现 1341.4nm 线偏振激光输出的实验。对实验系统的热焦距进行了理论计算和实验测量, 并且实验对比分析了平平腔和平凹腔的激光输出结果, 分别获得了 3.15W

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60208001)

作者简介: 段延敏(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事固体激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhg@fjirsm.ac.cn

收稿日期: 2007-12-10; 收到修改稿日期: 2008-05-06

和 2.86W 的 1341.4nm 线偏振激光输出。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示,抽运源为光纤耦合的半导

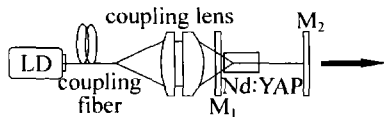


Fig.1 Schematic diagram of the diode-end-pumped Nd:YAP 1341.4nm laser

体激光器,最大输出功率 20W,发射中心波长为 803nm。光纤芯径为 1100 μm ,数值孔径为 0.12。抽运光经过由两个焦距分别为 60mm 和 30mm 的球面透镜组成的准直聚焦系统后会聚成直径 600 μm 左右的聚焦光斑注入 Nd:YAP 内部。整个透镜系统的光传输效率约为 84%。由于 Nd:YAP 对抽运光的吸收也有方向性,实验中通过相对于光纤轴向旋转晶体,选择吸收最大的方向。

增益介质为尺寸 $\varnothing 3.6\text{mm} \times 7\text{mm}$ 、*b* 向切割、掺钕的质量分数为 0.009 的 Nd:YAP 晶体。晶体的两端面被抛光并镀对波长 803nm,1079nm 和 1341.4nm 的增透膜。在 Nd:YAP 晶体侧面包裹一层铝箔,放在紫铜夹内,固定在制冷片上并进行控温。激光谐振腔由平面镜 M_1 和耦合输出镜 M_2 构成。其中平面镜 M_1 镀对 803nm 波长抽运光的增透 ($T = 96\%$)、对 1341.4nm 高反 ($R > 99.8\%$) 的介质膜。输出耦合镜 M_2 镀对 1341.4nm 波长部分透过的介质膜,实验中采用了不同透过率的平面镜片和平凹镜片进行了对比。为抑制最强谱线 1079nm 波长激光的振荡, M_1 和 M_2 都对 1079nm 波长有较大透过率 ($T > 70\%$)。

2 热焦距的理论计算和实验测量

由于热透镜效应和腔的稳定性、激光腔模尺寸、光束质量、激光效率等参量密切相关,因此有必要研究激光系统的热效应情况。LD 端面抽运固体激光器,激光晶体中的热聚焦效应在 1 级近似下等效于一个薄透镜,其热焦距可近似由下式给出^[9]:

$$f_{th} = \frac{4\pi\kappa_c\omega_p^2}{\xi \cdot P_{abs} [dn/dt + (n - 1)\alpha_t]} \quad (1)$$

式中, κ_c 是激光材料的热导率, ω_p 是抽运光斑半径, ξ 是抽运功率以热的形式释放到晶体的比例, P_{abs} 是被吸收的抽运功率, dn/dt 是折射率温度系数, n 是晶体的折射率, α_t 是晶体的热膨胀系数。将 Nd:YAP 的相关参量: $\kappa_c = 0.11\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\omega_p = 300\mu\text{m}$, $\xi = 0.48$, $dn/dt = 14.5 \times 10^{-6}/\text{C}$ ($//c$ 轴), $n = 1.95$, $\alpha_t = 10.8 \times 10^{-6}/\text{C}$ ($//c$ 轴),代入(1)式中,可计算出有效热焦距的值。

在端面抽运实验中,激光晶体紧靠全反镜片 M_1 ,根据激光腔的稳定性分析,当固定 M_2 ,增加抽运功率,激光输出功率会先增加,而热焦距缩短。当抽运功率增加到一定值时,热焦距减小到等于晶体到 M_2 的距离时,输出功率开始迅速下降。所以,可以通过这种判断方法来测量端面抽运激光器的热焦距。采用平平腔对抽运功率 9W ~ 20W 之间的热焦距进行了实验测量。随着抽运功率的变化,理论计算和实验测量得到热焦距的变化情况如图 2 所示。由图可知,使用(1)式计算的结果与实验测量的结果吻合较好。

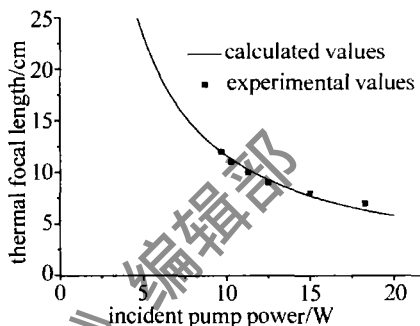
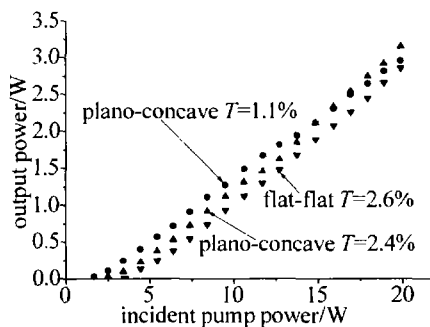


Fig.2 Thermal focal length versus incident pump power by means of theoretically calculation and experimentally measurement

3 实验结果与分析

根据热焦距的测量,采用腔长 $L = 4.2\text{cm}$ 的紧凑的平平和平凹腔型进行了实验,得到的实验结果如图 3 所示。通过 44W 型平面光栅单色仪扫描激光波长



和格兰-付科棱镜检偏,显示输出为平行于晶体 *c* 轴线性偏振的 1341.4nm 激光。输出耦合率为 $T = 1.1\%$ 及 $T = 2.4\%$ 的平凹腔和输出耦合率为 $T = 2.6\%$ 的平平腔,对应的阈值分别为 1.6W,2.5W 和 3.5W,输出功率的斜率分别为 16.5%,18.4%,17.5%。采用输出耦合率 $T = 1.1\%$ 平凹镜片的阈值最低,在低抽运功率下有较好输出。但由于透过率过小,随着抽运光功率的增加,腔内存在着较大的增益而无法有效输出,所以斜率小,在较高抽运功率下没有采用 $T = 2.4\%$ 的输出镜片的结果好。采用 $T = 2.4\%$ 的平凹输出镜片的输出功率略高于其它镜片,最高输出功率达 3.15W,光光转化效率达 15.8%。而平平腔的输出功率为

2.86W, 光光转化效率为 14.3%。从输出功率曲线可以看出, 在最高抽运功率下未见出现功率饱和, 通过增加抽运功率可望获得更高的输出。由于晶体质量较差, 经检测为 N 级, 腔内损耗较高, 对端抽运实验的影响较大, 因此效率偏低。采用高质量的激光晶体可望进一步提高激光器效率。

通过数值计算平平腔和平凹腔的腔模半径, 如图 4 所示。在整个抽运功率范围内, 平平腔的基模半径

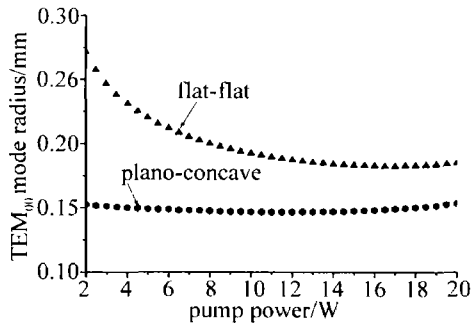


Fig. 4 Mode radius on laser crystal versus incident pump power

比平凹腔的大。在相近透过率下的实验结果, 显示采用平凹腔的阈值比平平腔的低, 输出功率比平平腔高。在 20W 抽运下, 平平腔和平凹腔的腔模半径与抽运光斑半径分别为 0.62 和 0.51。对比可知, 平平腔也有其优点, 由于其基模半径较大, 可实现更好的模式匹配, 并且光束方向性极好 (发散角小), 比较容易获得单横模振荡^[10]。虽然平凹腔基模半径不如平平腔的大, 但相对于平平腔, 衍射损耗比平平腔小, 腔的不对准灵敏度低, 故在激光输出功率上占优势。由于平凹腔基膜体积比较小, 激光介质中的增益分布集中, 所以激光阈值低。

采用输出耦合率为 2.4% 的平凹输出镜片, 改变腔长进行了实验。图 5 为在不同腔长下的输出功率随

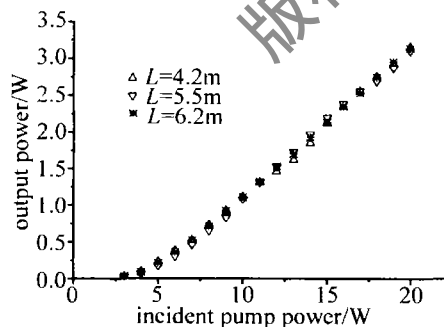


Fig. 5 Output power versus incident pump power for different cavity lengths for plano-concave cavity with $T=2.4\%$

抽运功率的变化曲线。从图中可以看出, 在稳定区内, 输出功率随腔长的变化不太敏感。

4 结论

作者采用 LD 端面抽运 Nd:YAP 晶体实现 1341.4nm 线偏振激光的输出。通过理论计算和实验测量了实验系统的热焦距。实验对比了平凹腔 (输出耦合率为 $T=1.1\%$ 和 $T=2.4\%$) 和平平腔 (输出耦合率为 $T=2.6\%$) 的输出结果, 并分析了激光振荡腔模对输出功率的影响。最后采用透过率为 2.4% 的平凹输出镜片获得了 3.15W 1341.4nm 线偏振激光输出, 斜率效率为 18.4%, 光光转化效率为 15.8%。采用透过率为 2.6% 的平面输出镜片, 获得了 2.86W 的输出, 斜率效率为 17.5%。

参考文献

- [1] WEI Y, ZHANG G, HUANG Ch H, *et al.* A single wavelength 1318.8nm Nd:YAG laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 258-260 (in Chinese).
- [2] BI Y, SUN Z P, LI R N, *et al.* High power blue Nd:YAG laser by intracavity summing frequency [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(1): 16-21 (in Chinese).
- [3] JIA F, WANG X Q, MA J Z. Report on 45 patients with digestive diseases who were treated by the Nd:YAP laser with endoscope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(11): 1054-1056 (in Chinese).
- [4] HAMISH O, MICHAEL J W, PETER D, *et al.* Efficient diode double-end-pumped Nd:YVO₄ laser operating at 1342nm [J]. Optics Express, 2003, 11(19): 2411-2415.
- [5] YE Y C, LIN W X, WANG G F, *et al.* Study on LD-pumped Nd:KGW thin-disk laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 536-538 (in Chinese).
- [6] SHEN H Y, ZENG R R, ZHOU Y P, *et al.* Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from $^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$ and $^4F_{3/2}-^4I_{13/2}$ [J]. A P L, 1990, 56(20): 1937-1938.
- [7] ZHU H Y, ZHANG G, HUANG C H, *et al.* High-power CW diode-pumped Nd:YAP laser at 1341.4 nm [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1413-1416 (in Chinese).
- [8] SHEN H Y, ZHOU Y P, ZENG R R, *et al.* Laser action of Nd:YAlO₃ at 1300nm [J]. J A P, 1991, 70(6): 3373-3374.
- [9] CHEN Y F, TSAI S W. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ yellow laser with intracavity sum-frequency mixing [J]. Opt Lett, 2002, 27(6): 397-399.
- [10] ZHOU B K, GAO Y Z, CHEN T R, *et al.* laser principles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 46-48 (in Chinese).