

高功率端面抽运 Nd·YVO₄ 固体激光器 模匹配的研究*

刘均海 吕军华 卢建仁 邵宗书 蒋民华
(山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘 要 研究了端面抽运 Nd·YVO₄ 固体激光器激光晶体内基模半径与抽运光斑半径的匹配。晶体的 Nd 掺杂原子数分数分别为 0.5% 和 2%，抽运功率分别为 10 W 和 14 W。结果表明：TEM₀₀ 模输出功率对于 w_1/w_{pa} 在低于 1 的很大范围内的变化不敏感，不存在一个确定的最佳 w_1/w_{pa} 值；在相对很小的 w_1/w_{pa} 情形，仍可获得高效单一的 TEM₀₀ 模输出，在这种情况下热透镜球差具有有限模孔径的作用。

关键词 模匹配. 热透镜球差. 衍射损耗. 端面抽运固体激光器。

1 引 言

激光二极管(LD)端面抽运固体激光器易获得高效高质量的 TEM₀₀ 模输出，这主要得益于端面抽运方式下，抽运光可在很大程度上与激光介质内的基模在空间上实现模式匹配。在低抽运功率条件下，模匹配要求振荡光基模半径 w_1 应不小于抽运光斑半径 w_p ^[1]。另外，在不考虑激光晶体中热效应的情况下，端面抽运理论模型结果指出，随着抽运功率的增加， w_1/w_p 应相应地增大^[2, 3]。在高抽运功率情况下，激光晶体中产生的热效应除表现为热透镜外，还存在伴随热透镜的高阶球差^[4]。理论模型数值计算结果表明：该球差在热透镜中心及其附近很小；而在偏离中心相对较远的横向区域内，热致球差很快增大^[7]。与此相应，过大的基模半径会使热透镜球差引起的附加衍射损耗急剧增大^[3, 6, 8]。因此，高抽运功率下激光晶体内基模半径应小于抽运光斑半径^[5, 6]。在固体激光器设计过程中，激光晶体内基模半径的大小决定着腔的热稳定范围(腔的热稳定范围 $\propto 1/w_1$)^[9]，因此模匹配问题对于高功率端面抽运固体激光器的优化极具重要意义。

本文设计的三镜折叠腔，可使激光晶体内基模半径 w_1 连续改变，最小 w_1 在 0.1 mm 左右。对高功率端面抽运 Nd·YVO₄ 激光器激光晶体内基模半径与抽运光斑半径的匹配进行了研究，结果表明高功率端面抽运 Nd·YVO₄ 固体激光器的模匹配完全不同于 Nd·YAG 目前已有的结果。

* 国家科委 863 高科技重大项目资助课题。

2 谐振腔的分析

采用适当的腔型结构, 通过改变腔长, 可使激光晶体内的基模半径 w_1 在一定范围内连续变化。本实验中设计的三镜折叠腔如图 1 所示。M₁ 为平面镜, 一面对 0.808 μm 增透, 另一面对 1.06 μm 全反。M₂ 为对 1.06 μm 部分透过的平面输出耦合镜, 透过率 $T = 18\%$ 。M₃ 是曲率半径为 200 mm 的平凹镜, 凹面镀 1.06 μm 的全反膜, 用作折叠镜。Nd·YVO₄ 晶体的一个端面镀 0.808 μm 和 1.06 μm 的双波长增透膜, 另一端面镀 1.06 μm 的增透膜。

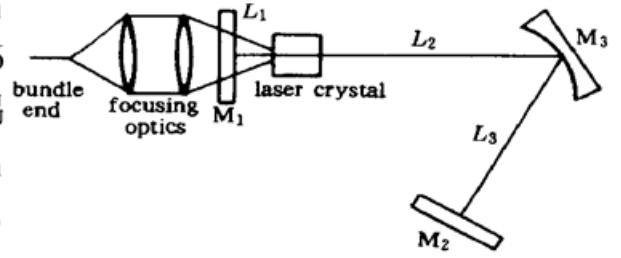


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

晶体侧面用铝箔包裹(以达到良好的热接触)置入紫铜块内, 外面用半导体制冷器冷却并可控温, 实验过程中晶体表面温度控制在 21℃。激光晶体中心至 M₁ 的距离 $L_1 = 5 \text{ mm}$, 至折叠镜 M₃ 的距离 $L_2 = 180 \text{ mm}$ 。改变 M₂M₃ 一臂的长度 L_3 可使基模半径 w_1 连续改变。本实验所用抽运源为光纤束耦合输出的高功率半导体激光器 OPC-D030-FCHS(Opto Power Corp.), 光纤束直径 1.55 mm, 数值孔径 $\text{NA} = 0.11$, 最大输出功率为 30 W。经聚焦系统后抽运光斑半径 w_p 约为 0.39 mm, NA 约 0.22。当所有的几何腔参数一定时, 即对于确定的腔结构, w_1 完全由激光晶体的热透镜焦距 f_T 所决定。因此, 应首先确定所用 Nd·YVO₄ 晶体的 f_T 随晶体吸收的抽运功率 P_{abs} 的变化关系。对实验中所使用的两块 Nd·YVO₄ 晶体(0.5%, 3 mm×3 mm×5 mm; 2%, 3 mm×3 mm×3 mm) 在高抽运功率下的热焦距 f_T 进行了实际测量。热光焦度 $1/f_T$ 随晶体中吸收的抽运功率 P_{abs} 的变化如图 2 所示。 P_{abs} 与抽运功率 P_{in} 的关系由实际测量通过晶体后的剩余抽运光功率确定。对于掺杂的原子数分数为 0.5%、尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm 的晶体, P_{abs} 约为 $0.90P_{\text{in}}$; 对于掺杂的原子数分数为 2%、尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm 的晶体, P_{abs} 约为 $0.93P_{\text{in}}$ 。抽运功率 P_{in} 为 10 W、14 W 下两种 Nd·YVO₄ 晶体的热焦距可由图 2 得到: 对于 0.5% 掺杂晶体, 当抽运功率 P_{in} 为 10 W 时, 热焦距为 1050 mm, 当抽运功率为 14 W 时, 热焦距为 600 mm; 对于 2% 掺杂晶体, 当抽运功率为 10 W 时, 热焦距为 500 mm, 当抽运功率为 14 W 时, 热焦距为 300 mm。

热焦距 f_T 确定后, 根据 ABCD 传输矩阵理论可计算出不同抽运功率下激光晶体内基模半径 w_1 随 L_3 的变化关系, 如图 3 所示。可以看出, 当 L_3 从 85 mm 增加至 195 mm 时, 可使

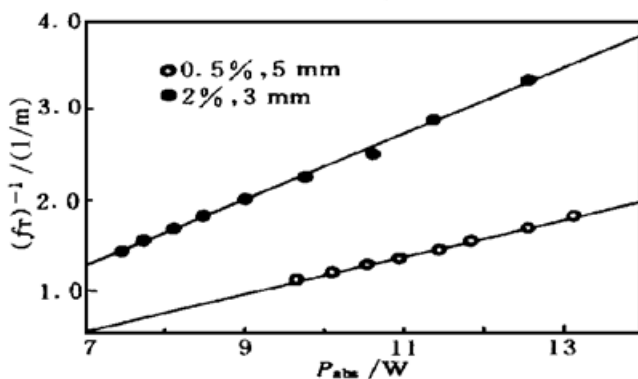


Fig. 2 Thermal focal power $1/f_T$ as a function of absorbed pump power P_{abs}

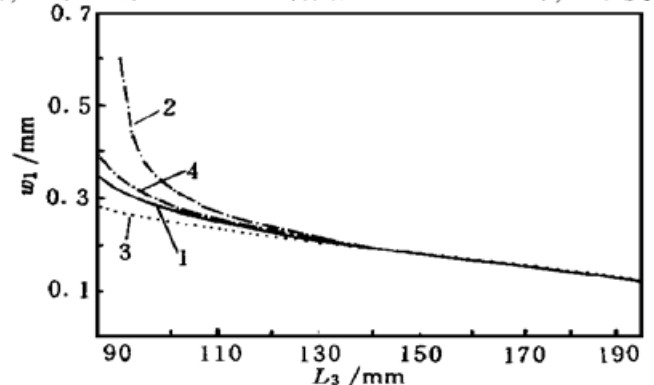


Fig. 3 Variations of mode radii w_1 with L_3 for two different crystals at pump powers of 10 W and 14 W. 1: $P_{\text{in}} = 10 \text{ W}$, 2%; 2: $P_{\text{in}} = 10 \text{ W}$, 0.5%; 3: $P_{\text{in}} = 14 \text{ W}$, 2%; 4: $P_{\text{in}} = 14 \text{ W}$, 0.5%

w_1 在很大范围内连续变化。这一腔结构的另一显著特点是, 当 $L_3 > 135$ mm 时, w_1 即不再随 f_T 变化, 这意味着不同抽运功率下, 不同 Nd:YVO₄ 晶体基模半径 w_1 是相同的。

3 结果及讨论

高抽运功率下激光晶体对抽运光的吸收是在一定纵向距离内完成的, 在这一吸收距离内抽运光将产生很大的发散, 因此高功率下仅用 w_p 已不足以表征抽运光在晶体内的分布情况。此时考虑到抽运光的发散角 θ_p 及晶体的吸收系数 α 而引进抽运光在晶体内的平均半径 w_{pa} 更为合理^[10]。本实验中抽运光焦斑基本位于晶体的抽运端面上, 因此, $w_{pa} = w_p + NA/\alpha$ ^[10]。 α 与晶体的 Nd³⁺ 掺杂, 对于 2% 掺杂的 Nd:YVO₄ 晶体, $\alpha = 7.07$ mm⁻¹^[11], 相应得到 $w_{pa} = 0.42$ mm; 对于 0.5% 掺杂的 Nd:YVO₄ 晶体, $\alpha = 0.88$ mm⁻¹^[11], 相应得到 $w_{pa} = 0.64$ mm。

测量了抽运功率 P_{in} 分别为 10 W、14 W, L_3 在 85 ~ 195 mm 范围内变化时的输出功率

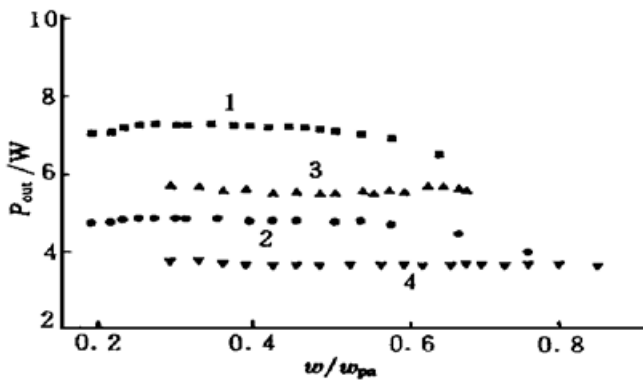


Fig. 4 Relations between output power and the ratio of mode radius to pump spot size at fixed pump powers of 10 W and 14 W. 1: $P_{in} = 14$ W, 0.5%; 2: $P_{in} = 10$ W, 0.5%; 3: $P_{in} = 14$ W, 2%; 4: $P_{in} = 10$ W, 2%

YVO₄ 激光器的效率可望获得大的提高。

从图 4 所得到的另一个重要结果是, 在很小的 w_1/w_{pa} 比值(对于 0.5% 掺杂的晶体, $w_1/w_{pa} \approx 0.2$; 对于 2% 掺杂的晶体, $w_1/w_{pa} \approx 0.3$), 高抽运功率下基模输出功率仍没有显著下降。此时, Nd:YVO₄ 晶体内的基模半径 $w_1 \approx 0.12$ mm, 而 $w_p \approx 0.39$ mm。值得指出, 在如此小的基模半径情形, 高功率下仍维持单一 TEM₀₀ 模振荡。产生这一结果的原因, 正在于热透镜球差的衍射损耗。在热透镜中心附近, 球差很小; 远离中心后则球差很快增大^[7]。TEM₀₀ 模局限于热透镜中心附近很小的横向区域内, 所经受的热致损耗相对很小; 而高阶横模分布于离热透镜中心相对较远的横向区域, 所遭受的球差衍射损耗较 TEM₀₀ 模的相应损耗要高得多, 因此热透镜球差起到了限模孔径的作用。这一解释的有力的实验证据是, 在 $w_1 \approx 0.12$ mm 时, 接近阈值的低抽运功率下有高阶横模伴随出现。因为此时热效应可以忽略, 热致损耗对高阶横模的抑制作用随即消失。

高抽运功率下小模半径仍可获得高效基模输出, 这一结论对于高功率激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器的设计与优化具有极为重要的实际意义。因为基模半径越小, 谐振腔的热稳定范围就可设计得越宽^[9], 而宽的热稳定范围无疑会使激光器的整体性能大为提高。

P_{out} , 结果如图 4 所示。图 4 显示出输出功率在相当大的范围内对于 w_1/w_{pa} 的变化不敏感, 不存在确定的单一最佳 w_1/w_{pa} 比值。这一结果与目前已知的端面抽运 Nd:YAG 固体激光器的相应结果完全不同^[3]。然而, 这一结果并不说明振荡光与抽运光的空间匹配不重要, 而是意味着高抽运功率下, 由热透镜球差引起的衍射损耗对于 w_1/w_{pa} 的变化极为敏感。任何由增加 w_1/w_{pa} 比值以改善振荡光与抽运光的空间匹配而获得的效率提高都将被由此引起的附加衍射损耗所抵消。这一结果同时也暗示, 如果能够设法减轻乃至消除热透镜球差, 则在大的 w_1/w_{pa} 情形下, 端面抽运 Nd·

结 论 以上研究表明, 在高功率激光二极管端面抽运 Nd·YVO₄ 固体激光器情形, 基模的输出功率对于 w_1/w_{pa} 在低于 1 的很大范围内的变化不敏感, 不存在确定的最佳 w_1/w_{pa} 比值; 在非常小的基模半径情况下, 仍可维持高效单一基模振荡, 热透镜球差具有有限模孔径的作用。

参 考 文 献

- [1] Fan T Y. Pump source requirements for end-pumped lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **QE-26**(2): 311~ 316
- [2] Laporta P, Brussard M. Design criteria for mode size optimization in diode pumped solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(10): 2319~ 2326
- [3] Chen Y F, Huang T M, Kao C F *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: Influence of thermal effect. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-33**(8): 1424~ 1429
- [4] Tidwell S C, Seamans J F, Bowers M S *et al.*. Scaling CW diode-end-pumped Nd·YAG lasers to high average powers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(4): 997~ 1009
- [5] Clarkson W A, Hanna D C. Efficient Nd·YAG laser end-pumped by a 20-W diode-laser bar. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12): 869~ 871
- [6] Nighan Jr. W L, Park M, Kehstead M S *et al.*. Diode pumped laser with strong thermal lens crystals. *US Patent*, 5410559, Apr. 25, 1995.
- [7] Frauchiger J, Albers P, Weber H P. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd·YAG lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(4): 1046~ 1056
- [8] Kaneda Y, Oka M, Masuda H *et al.*. 7.6 W of continuous-wave radiation in a TEM₀₀ mode from a laser-diode end-pumped Nd·YAG lasers. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(14): 1003~ 1005
- [9] Magni V. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1): 107~ 117
- [10] Chen Y F, Kao C F, Wang S C. Analytical model for the design of fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers. *Opt. Commun.*, 1997, **133**(1~ 6): 517~ 524
- [11] 何京良. 大功率全固态 Nd·YVO₄ 激光器. 博士学位论文, 北京: 中国科学院物理研究所, 1998.

Mode Matching in High-Power Laser-Diode-Array End-Pumped Nd·YVO₄ Solid-State Lasers

Liu Junhai Lu Junhua Lu Jianren Shao Zongshu Jiang Minhua

(National Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(Received 26 October 1998)

Abstract The mode matching in high-power end-pumped Nd·YVO₄ solid-state lasers has been investigated by employing two different Nd³⁺-doped crystals at pump power of 10 W and 14 W, respectively. The results show that the output power in TEM₀₀ mode is insensitive to the ratio of fundamental mode radius to averaged pump spot radius (w_1/w_{pa}) over a large range of $w_1/w_{pa} < 1$, and there is no obvious optimal w_1/w_{pa} ratio at which the output power is maximized. The results also indicate that high efficient radiation in single TEM₀₀ mode is still available in the situation of very small w_1/w_{pa} ratio due to the aperture effect arising from thermal lens spherical aberrations.

Key words mode matching, thermal lens, spherical aberration, diffraction losses, end-pumped solid-state lasers.