

文章编号: 0258-7025(2010)11-2780-04

径向、切向热透镜效应对高亮度激光器输出特性的影响

丁欣^{1,2} 李雪^{1,2} 盛泉^{1,2} 李斌^{1,2} 周睿^{1,2} 温午麒^{1,2} 王鹏^{1,2}

姚建铨^{1,2} 宋峰³ 禹宣伊³ 张光寅³

¹ 天津大学激光与光电子研究所, 天津大学精仪学院, 天津 300072
² 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072
³ 南开大学物理科学学院, 天津 300071

摘要 在所有激光二极管(LD)侧面抽运的固体激光器的输出功率曲线中都存在一个平缓区域。通过对径向和切向热透镜焦距的理论计算,发现平缓区域出现在径向稳区边缘,在平缓区之后输出功率将继续升高,并在切向稳区边缘达到最大值,此时 M^2 理论值最小。得出平缓区是由径向、切向稳区的共同作用导致的,并且在切向稳区边缘可以实现高亮度激光器的结论。基于以上理论分析,设计了一个具有简单平-平腔结构、LD 侧面抽运的 Nd:YAG 高亮度激光器。实验中采用短腔型,并使其工作在稳功率点,当腔长为 200 mm,入射的抽运光功率为 220 W 时,获得了输出功率为 50 W, M^2 理论值为 2 的高亮度 1064 nm 连续激光输出。

关键词 激光器;激光二极管侧面抽运;热透镜;径向稳区;切向稳区

中图分类号 TN 248. 1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2780

Impact of Radial and Tangential Thermal Lens Effect on Output Characteristics of High-Brightness Lasers

Ding Xin^{1,2} Li Xue^{1,2} Sheng Quan^{1,2} Li Bin^{1,2} Zhou Rui^{1,2} Wen Wuqi^{1,2}
Wang Peng^{1,2} Yao Jianquan^{1,2} Song Feng³ Yu Xuanyi³ Zhang Guangyin³

¹ College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of Laser and Opto-Electronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China

³ School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract Gentle zones were found in all output power curves of laser-diode (LD) side-pumped solid-state lasers. Through the calculation of the radial and tangential thermal lens effect, the gentle zones were found at the boundary of the radial stability zones, going through the gentle zone, the output power increased continuously and reached its highest value at the boundary of the tangential stability zone with the lowest M^2 value. The gentle zones were thought to be due to the combined effects of the radial and tangential stability zones and high-brightness lasers can be obtained at the stable power point. Based on this, a simple high-brightness laser with a cavity length of 200 mm was designed to operate at the boundary of the tangential stability zone, and laser at 1064 nm with output power of 50 W and theoretical beam factor $M^2 = 2$ was achieved when the pump power was 220 W.

Key words lasers; laser diode-side-pumped; thermal lens; radial stability zone; tangential stability zone

1 引言

高亮度激光器由于其高功率和高的光束质量而

具有很多应用,而热效应则是影响固体激光器高亮度的主要因素^[1,2]。对于固态激光器,采用不同的

收稿日期: 2009-12-28; 收到修改稿日期: 2010-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(60978021, 10804055)和国家 973 计划(2007CB310403)资助课题。

作者简介: 丁欣(1972—),男,副教授,主要从事全固态激光器及非线性频率变换等方面的研究。

E-mail: dingxin@tju.edu.cn

方案来解决热效应,可以实现高功率^[3~6]。同时,人们发现在输出功率曲线中都存在平缓区域。1996年,K. Yasui^[7]设计的对称稳定腔 Nd:YAG 激光器中,在没有双折射补偿时,输出功率曲线中存在一个平缓区域,但文章没有对其给出解释。宋峰等^[8]在2001年解释了输出功率中的凹陷现象,指出了热透镜效应和腔长对激光输出特性的复杂影响;2002年,宋峰等^[9]提出随着抽运功率的增加,热透镜焦距的降低和腔内损耗增大导致输出功率曲线中存在一个平缓区域。

可见在全固态激光器中存在平缓区域已经是一个普遍的现象,但是没有人给出明确的解释。本文通过对径向、切向热透镜效应的计算,指出平缓区域是径向与切向稳区的共同作用的结果,并且平缓区域出现在基模光斑半径 U 型曲线的径向稳区边缘。

在切向稳区边缘功率达到最大值,此时 M^2 因子的理论值最小,称为高亮度点。

2 实验装置及理论分析

实验采用简单平-平腔结构,用激光二极管(LD)侧面抽运掺杂原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体棒($\phi 3 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$),晶体棒夹在铜制水冷块中,实验设定温度为 23 °C。激光二极管包括三组激光二极管阵列,每个阵列由 4 个功率为 40 W 的激光二极管条组成。镜子 M_1 是 1064 nm 高反镜,并紧贴激光二极管侧面抽运激光头(镜子 M_1 到激光头左侧的距离为 $L_1 = 0$)。输出镜 M_2 对 1064 nm 光的透射率为 20%,其距激光头右侧的距离设为 L_2 ,实验中可根据需要改变 L_2 的值。

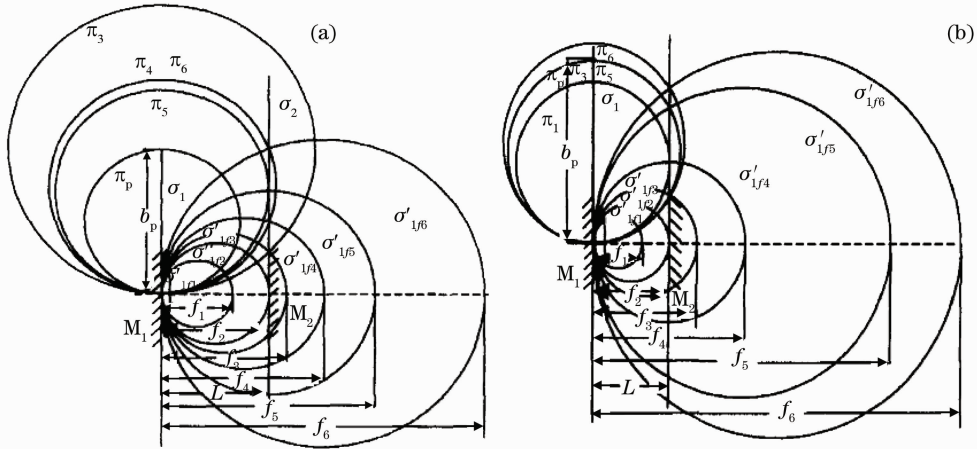


图 1 M_1 镜的变换圆及参数。(a) $L > b_p/2$; (b) $L < b_p/2$

Fig. 1 Transformation circle and parameters of mirror M_1 . (a) $L > b_p/2$, (b) $L < b_p/2$

图 1 是平-平腔 Nd:YAG 激光器谐振腔优化设计的变换圆理论图^[10]。激光器运行时,激光介质可等效成一个薄透镜。图中 σ_1 是 M_1 镜处的波面, $\sigma'_{1f1}, \sigma'_{1f2}, \sigma'_{1f3}, \sigma'_{1f4}, \sigma'_{1f5}$ 和 σ'_{1f6} 是 σ_1 经薄透镜后的变换圆,其直径等于激光介质的热透镜焦距 f_i ,并切 M_1 镜于光轴处。热透镜处的束参数为 $b_\pi = f_i \sqrt{L/(f_i - L)}$,其中 b_π 为 π 圆的直径(π 圆是过 σ 圆与镜 M_1 和 M_2 的两个焦点,并与光轴切于热透镜处的圆)。 $L = L_2 + l/(2n)$ 是等效腔长,其中 l 为激光介质的长度。热透镜处的基模光斑半径为 $\omega_i = \sqrt{b_\pi \lambda / \pi} = [(\lambda f_i / \pi) \sqrt{L/(f_i - L)}]^{1/2}$,其中 λ 为振荡激光的波长。

激光腔的衍射损耗为 $\alpha = (b_\pi - b_p)/b_p$,其中 b_p 为抽运光的束参数。如图 1(a) 所示,当 $L > b_p/2$

时,总有 $b_{\pi \min} > b_p$,此时由于激光光斑与抽运光斑不完全重合,输出激光会不可避免地存在衍射损耗。如图 1(b) 所示,当 $L < b_p/2$ 时,总有 $b_{\pi \min} < b_p$,所以总可以找到一个 b_π 使得 $b_\pi = b_p$,此时激光光斑可与抽运光斑完全重合,衍射损耗最小。所以,为了获得高功率、高光束质量的激光输出,所选用的腔长应满足 $L < b_p/2$ 。

对于侧面抽运的激光器,光束尺寸由式 $\phi = 2\sqrt{\pi}\omega_i$ 决定,其中 ϕ 是激光棒的直径, ω_i 为热透镜处的基模光斑半径。抽运光的半径为 $\omega_p = \sqrt{b_p \lambda / \pi}$ 。实验中使用的介质棒的直径为 $\phi = 3 \text{ mm}$,当 $\omega_i = \omega_p$ 时,可得 $b_p = 2114.7 \text{ mm}$,当 $L < b_p/2 = 1057.4 \text{ mm}$,衍射损耗最小。

图 2 绘出了径向和切向焦距的理论曲线^[11]。

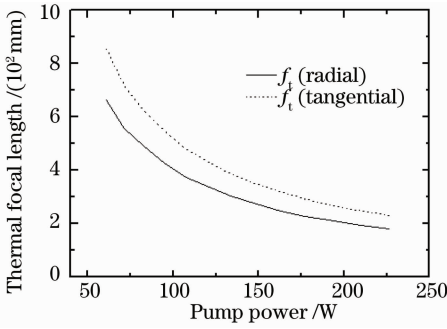


图 2 Nd:YAG 晶体的热透镜焦距

Fig. 2 Thermal focal length of the Nd:YAG crystal

3 实验结果及分析

用功率计 (Moletron EPM1000) 分别测量了 $L_2=200$ mm 和 250 mm 时激光的输出功率。图 3 示出了在特定腔长下输出功率和热透镜处基模光斑半径的理论值随抽运功率的变化曲线。径向、切向焦距导致存在一个径向和一个切向基模光斑半径，

且其曲线均为 U 型。当 $L_2=200$ mm 和 250 mm 时, 在径向稳区边缘, 均发现了平缓区域。在稳区之后, 输出功率继续增大, 并且在切向稳区边缘达到最大值。

随着抽运功率的增大, 热透镜焦距逐渐减小, 激光器开始进入稳区。当达到激光器的阈值时, 就会产生激光。在稳区内, 随着抽运功率的增大输出功率急剧增大。但在径向稳区的边缘, 输出功率的变化不明显。这是因为在径向稳区边缘径向稳区对激光器的作用已减小为零, 但激光仍然运行在切向稳区, 此处输出功率的增大量与减小量相互抵消。所以, 在径向稳区边缘存在一个平缓的区域, 输出功率变化不明显。之后, 随着抽运功率的增大输出功率继续增大, 直到切向稳区边缘达到最大值, 这个点叫做稳功率点。在稳功率点, 输出功率最大, M^2 因子的理论值最小。当激光进入非稳区后, 输出功率急剧减小, 直到为零。这恰好证明在激光器中同时存在径向模和切向模。

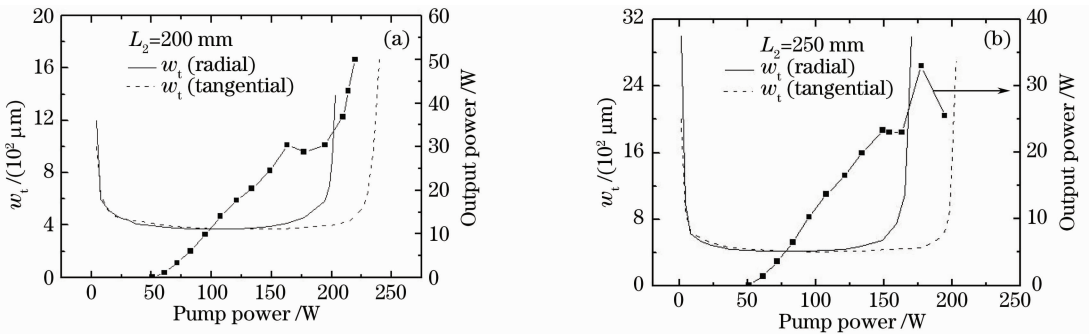
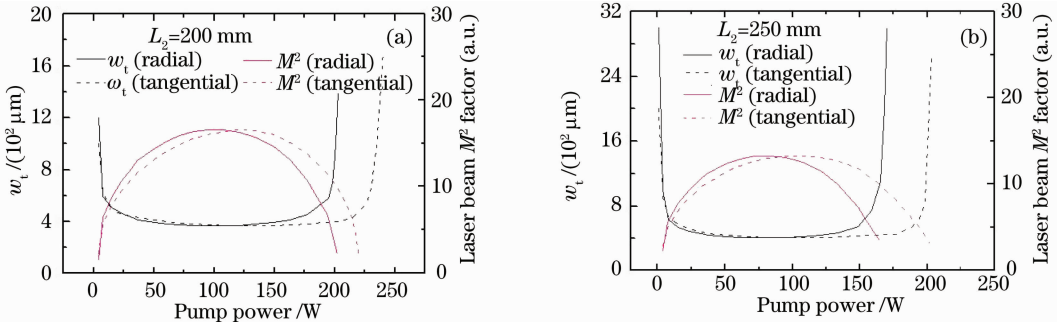


图 3 输出功率和热透镜处基模光斑半径的理论值随抽运功率的变化

Fig. 3 Theoretical radius of the fundamental mode spot at the thermal lens and the output power as a function of pump power

图 4 为在特定腔长下 M^2 因子的理论值和热透镜处基模光斑半径的理论值随抽运功率的变化曲

线。可见当激光器运行在切向稳区边缘时, M^2 因子的理论值最小。

图 4 M^2 因子的理论值和热透镜处基模光斑半径的理论值随抽运功率的变化Fig. 4 Theoretical radius of the fundamental mode spot at the thermal lens and the theoretical M^2 values as a function of pump power

4 结 论

通过对激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 激光器径向、切向热透镜效应的计算,发现径向、切向稳区的共同作用使得激光器输出功率曲线中存在平缓区域,并且在切向稳区边缘可实现高亮度。在实验中获得了输出功率为 50 W, M^2 理论值为 2 的 1064 nm 的高亮度激光输出。输出功率曲线在径向稳区边缘出现平缓区域,且在平缓区域之后输出功率继续增加,在切向稳区边缘达到最大值,此处 M^2 因子的理论值最小。实验中平缓区域的存在证明了激光运行时同时存在径向、切向稳区,切向稳区边缘即高亮度点是激光器的最佳工作点。

参 考 文 献

- 1 Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 359~363
孙 尧, 李 涛, 于果蕾等. 激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO₄ 晶体热效应分析及倍频研究 [J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 359~363
- 2 Zhao Jianlin, Peng Tao, Ye Zhijun. Hot-image effects in high-power solid-state laser systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1315~1322
赵建林, 彭 涛, 叶知隽. 高功率固体激光系统中的“热像”效应 [J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1315~1322
- 3 A. Geng, Y. Bo, X. D. Yang *et al.*. Intracavity sum-frequency generation of 3.23 W continuous-wave yellow light in a Nd:YAG laser [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **255**(4-6): 248~252
- 4 X. J. Guo, W. Hou, H. B. Peng *et al.*. 4.44 W of CW 515 nm green light generation by intracavity frequency doubling Yb:YAG thin disk laser with LBO [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 451~454
- 5 Q. Zheng, Y. Yao, B. Li *et al.*. 13.2 W laser-diode-pumped Nd:YVO₄/LBO blue laser at 457 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2009, **26**(6): 1238~1242
- 6 C. Czeranowsky, E. Heumann, G. Huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BiBO laser with 2.8-W output power at 473 nm, [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 432~434
- 7 K. Yasui. Efficient and stable operation of a high-brightness CW 500-W Nd:YAG rod laser [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(15): 2566~2569
- 8 Song Feng, Ding Xin, Zhang Chaobo *et al.*. Dips of output power curve of pumped Nd:YVO₄ plane-parallel cavity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 974~976
宋 峰, 丁 欣, 张潮波等. LD 抽运 Nd:YVO₄ 平行平面腔中的激光输出功率凹陷 [J]. 中国激光, 2001, **A28**(11): 974~976
- 9 F. Song, C. B. Zhang, X. Ding *et al.*. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(12): 2145~2147
- 10 Wu Ding'er, Zhou Rui, Zhang Xiaohua *et al.*. Output characteristics of LD end-pumped Nd:YVO₄ solid-state laser with flat-flat cavity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1196~1200
武丁二, 周 睿, 张晓华等. LD 端抽运平直腔 Nd:YVO₄ 固体激光器的输出功率特性研究 [J]. 物理学报, 2006, **55**(3): 1196~1200
- 11 W. Koechner. Thermal lensing in a Nd:YAG laser rod [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(11): 2548~2553