

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0070-04

全固体激光器热透镜效应及其对激光输出和腔稳定性的影响

谢 武, 余建华*, 毕 成, 郑 伟, 祝 强

(深圳大学工程技术学院 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 运用高斯光束矩阵变换对半导体激光侧面抽运 YAG 激光器在动态热透镜效应影响下的谐振腔参数进行了理论分析和计算。利用非稳腔法测量了抽运模块热透镜焦距随抽运电流变化的关系。讨论了动态热透镜效应对激光输出和腔稳定性的影响, 并进行了相应的实验验证。

关键词 激光技术; 固体激光器; 半导体激光侧向抽运; 热透镜效应; 谐振腔

中图分类号 TN248.1; TN241 **文献标识码** A

Thermal-Lens Effect and Influence on Laser Output and Stability of Resonator in the All-Solid-State Laser

XIE Wu, YU Jian-hua, BI Cheng, ZHENG Wei, ZHU Qiang

(Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, School of Engineering and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract By using of matrix method and *ABCD* law for Gaussian beam, the resonator parameters of the YAG laser have been analyzed and computed under considering of the thermal-lens effect. The thermal lens effect as the function of the pump current is measured by "unstable resonator" method. The influences of the dynamic thermal lens effect on the laser output and their stabilities are discussed and verified by experiments.

Key words lasers technique; solid-state laser; laser diode side-pumping; thermal-lens effect; resonator

1 引 言

在高功率半导体激光侧向抽运固体激光器中, 由于热透镜效应激光晶体可等效为一个焦距随抽运功率变化的薄透镜, 对谐振腔的几何参数和振荡模产生影响, 从而直接影响了激光输出的功率和光束质量。热效应严重时, 甚至可能改变原有激光腔的约束稳定性, 导致腔损耗过大, 无激光输出。因此, 在优化腔型参数时, 就有必要考虑热透镜效应的影响。目前研究中普遍采用的方法是考虑热透镜效应的情况下, 利用腔内高斯光束矩阵变换和 *ABCD* 定律来分析腔内几何参数和热透镜焦距对腔内振荡模的影响^[1,2]; 在讨论稳定区取值方面, 已经推导并用稳定区图来描述激光器的稳定区范围^[3], 但是还缺少与稳定区图相应实验验证的文献报道。

本文通过考虑热透镜腔内高斯光束的矩阵变换

和 *ABCD* 定律来讨论腔内几何参数选取和热透镜效应对腔内振荡模的影响, 在此基础上, 实验测得热透镜焦距随稳压抽运源抽运电流变化的曲线, 从而可通过比较腔内动态模参数和激光输出功率两者随抽运电流变化的曲线, 更加直观地描述热透镜效应对激光输出的影响; 另外, 本文通过腔的稳定性条件来推断动态热焦距情况下, 腔长应取的稳定区范围, 并进行了相应实验验证。

2 热透镜激光腔理论分析

对于侧向抽运的棒状 YAG 晶体, 其热焦距 f 可表示为^[4]

$$f = M/P_{in}, \quad (1)$$

式中 M 包含了所有的激光棒材料参量和效率因子 η , η 是电输入功率 (P_{in}) 与棒中热散耗功率 (P_s) 之

基金项目: 深圳市科技基金资助课题。

作者简介: 谢 武(1981), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器及非线性频率技术的研究。

E-mail: sy031402@szu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jyu@szu.edu.cn

比($P_a = \eta P_{in}$)。

对于 LD 抽运的情况,由于 LD 有阈值,在恒压电源情况下,由(1)式有

$$f = M' / (I_p - I_{th}), \quad (2)$$

式中 I_p 为抽运电流, I_{th} 为 LD 的阈值电流, M' 在 M 的基础上又包含了抽运电压参数 U 。定义热透镜的光焦度 $d = 1/f$, 则(2)式可表示为

$$I_p = M'd + I_{th}, \quad (3)$$

从式中可以看到抽运电流 I_p 和光焦度 d 呈线性对应关系。

在对谐振腔进行分析时,热焦距为 f 的 YAG 棒可用一个焦距为 f 的薄透镜表示。内含热透镜的激光平-平腔如图 1 所示, M_1, M_2 是平面镜, 腔内热透镜距两反射镜距离为 L_1, L_2 。以激光棒中心为参考点, 往返一周的 ABCD 矩阵可写为^[5]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

所选参考面的光斑半径 w_r 为^[5]

$$w_r = \left[\frac{2\lambda |B|}{\pi \sqrt{4 - (A + D)^2}} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中 λ 为激光波长。

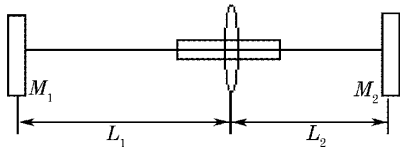


图 1 含热透镜的激光平-平腔示意图

Fig. 1 Plane-plane cavity with thermal lens

给定 L_1 和 L_2 , 通过(4), (5) 两式, 可得 w_r 随热

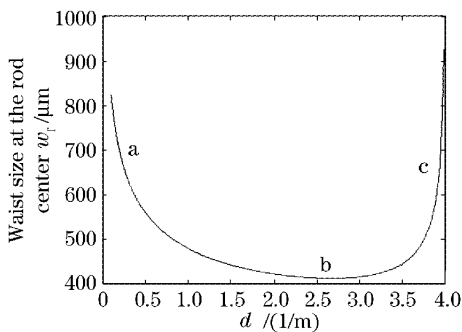


图 2 工作物质中心光斑半径随光焦度 d 变化的计算曲线 ($L_1 = 150 \text{ mm}, L_2 = 250 \text{ mm}$)

Fig. 2 Waist size at the rod center w_r as a function of the focal power d ($L_1 = 150 \text{ mm}, L_2 = 250 \text{ mm}$)

透镜光焦度 d 变化的曲线, 如图 2 所示。考察激光棒中心光斑是因为它决定了激光基模的模体积, 且对激光的输出功率、光束质量以及热稳定性都有直接的影响^[6]。图 2 为 $L_1 = 150 \text{ mm}, L_2 = 250 \text{ mm}$ 时 w_r 随 d 变化的曲线。

图 2 中的曲线变化分为三个阶段: 在曲线的开始(图中的 a 段), 光斑半径随光焦度的增大而迅速减小, 此时基模体积大, 光束质量好, 但是此时抽运功率低(对应光焦度小), 未达到激光阈值或输出功率低。在曲线的中间(图中的 b 段), 曲线斜率几乎为零, 此时基模光斑随光焦度的变化很小, 基本稳定, 此状态即是人们经常利用的热稳定腔状态, 此状态下基模体积小, 一般为多模运转, 输出功率大, 光束质量不好。在曲线的最后(图中的 c 段), 基模光斑随光焦度的增加而迅速增长, 基模体积大, 输出功率高, 光束质量也好, 此时的腔型处于稳定区的边缘。在稳定区和非稳区交界处, 由于基模光斑的迅速增加, YAG 棒的自孔径带来的衍射损耗也迅速增大, 导致激光功率下降, 最后下降为 0。

由谐振腔的稳定性条件有

$$-1 < (A + D)/2 < 1, \quad (6)$$

设 $L_1 = nL_2, n \geq 1$, 将(3)式代入(6)式可得总的稳定区条件为

$$L_2 < \frac{f}{n} \quad \text{or} \quad f < L_2 < \frac{n+1}{n}f. \quad (7)$$

图 3 为激光腔的稳定区图, 图中有两个稳定区域, 在稳定区域内(划线部分)腔型是稳定的, 可保证激光输出, 稳定区域外腔型为非稳腔, 不能保证激光的振荡。

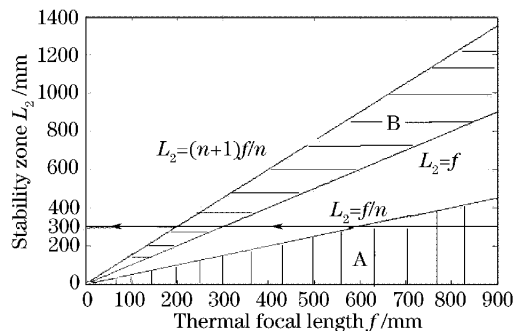


图 3 光腔稳定区间与热焦距的关系 ($L_1 = 2L_2$)

Fig. 3 Stability zone versus thermal lens focus ($L_1 = 2L_2$)

3 实验及其分析

3.1 热透镜焦距测量

传统的 He-Ne 激光探测法测量激光工作物质

的热焦距有如下的局限性:1)实验装置复杂,测量过程需寻找焦点,实际操作麻烦,误差较大;2)不便于在 YAG 红外激光振荡的情况下进行测量,而且可见的 He-Ne 光测量热透镜焦距与实际的红外 1064 nm 对应的焦距会有所误差。因此,我们采用腔的非稳定性原理测量固体激光器的热焦距^[7,8]。

如图 1 所示的平-平热透镜腔,由(7)式可推知,当腔型条件满足 $L_1 < f$ 和 $L_2 < f$ 时,激光腔处于稳定区。若 M_2 紧贴模块,保证 $L_2 < f$,则要保证激光器工作在稳定区内,有激光输出,就需有 $L_1 < f$,且腔型不构成对称腔即可。此原理可用来测量抽运模块的热透镜焦距。

搭建的实验装置如图 4 所示,实验采用海特光电公司制作的 LD 侧向抽运 Nd:YAG 模块(晶体棒直径为 3 mm,长为 75 mm),采用水冷方式(水温 22 °C),实验中选取不同的 L_1 ,对每一组值逐渐加大电流到激光输出停止,对应于此抽运电流的热焦距值即为当时的 L_1 值,测量结果如图 5 所示。

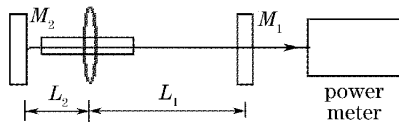


图 4 激光二极管侧向抽运大功率固体激光器热焦距测量示意图

Fig. 4 Scheme of experimental setup for thermal lens focal length measurement

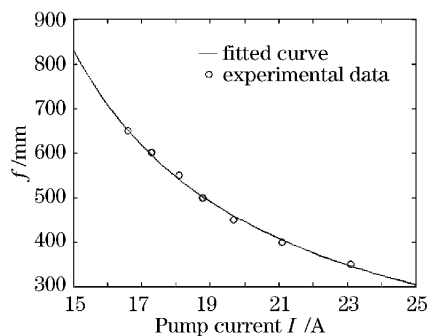


图 5 热焦距 f 与抽运电流 I 的实验曲线拟合

Fig. 5 Measured thermal lens focal length of YAG crystal rod as a function of pump current

根据经验公式(3)对测得的数据进行拟合,得到拟合参量: $M=4.80 \text{ A} \cdot \text{m}$,热透镜阈值电流 $I_{\text{th}}=9.22 \text{ A}$ 。

3.2 腔型参数与激光输出测量

实验所用的激光器结构如图 1 所示, M_2 为 1064 nm 高反, M_1 为 10% 输出镜,选取特定的腔型

分布,测量激光输出功率随抽运电流变化的关系。

取 $L_1=400 \text{ mm}$, $L_2=200 \text{ mm}$,测量此时激光输出功率随抽运电流变化的关系,同时,根据上面得到的经验公式(3)和表达式(4),(5)联立,就可以得到理论上棒中心基模光斑半径随抽运电流的变化曲线,两曲线如图 6 所示。

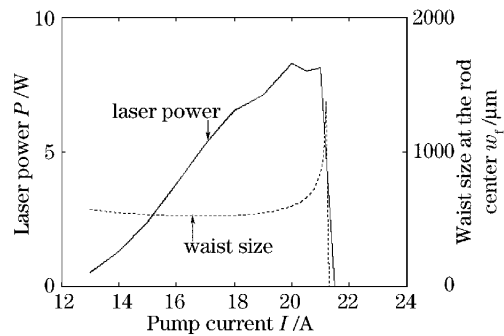


图 6 $L_1=400 \text{ mm}$, $L_2=200 \text{ mm}$ 情况下,激光输出功率和棒中心基模光斑大小随抽运电流变化的比较

Fig. 6 Laser power and the waist size at the rod center as the function of the pump current ($L_1=400 \text{ mm}$, $L_2=200 \text{ mm}$)

从图 6 可以看出,随着抽运电流的增大,在曲线的前段抽运电流较小的情况,棒中心基模腰斑 w_1 随抽运电流变化很小,激光输出功率也呈线性增长的趋势;当抽运电流达到约 20 A 时, w_1 随抽运电流增大而迅速增大,基模体积迅速增大,抑制了多模。同时激光腔内的孔径选模造成的损耗也迅速增大,最后腔型由于热透镜效应偏出稳定区。与之对应,此时的激光输出功率随抽运电流的增大也呈饱和和下降趋势,直到腔型偏出稳定区,激光功率下降为零。

3.3 热稳定腔实验测量

取腔型参数为 $L_1=2L_2$, $L_2=300 \text{ mm}$,参考图 3 可以看到,此时存在两个稳定区 $L_2 < f/2$ (稳定区 A)和 $f < L_2 < 3f/2$ (稳定区 B),随着抽运电流的增大,激光介质的热焦距逐渐减小,如图 3 中直线的走势,其腔型也将先处于稳定区 A,然后移出稳定区,激光停止振荡;再随着热透镜焦距 f 继续增大,进入稳定区 B 中,激光又回复振荡。实验测得上述激光器输出功率随抽运电流变化曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在较小的抽运电流时,激光腔处于 A 稳定区内,激光的功率随抽运电流线性增长。当抽运电流增大到第一个稳定区与非稳区的临界点(即 17.4 A)时,棒中心的基模光斑随着光焦度的增大而急剧增大(参见图 2 的 c 段),此时 YAG 棒的孔径限制带来的衍射损耗也急剧增大,导致激

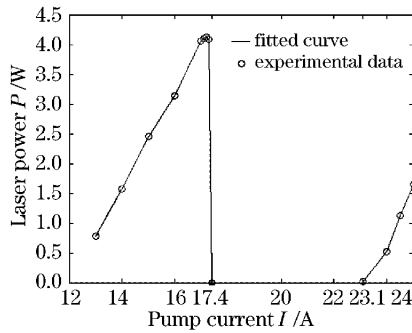


图7 $L_1=2L_2, L_2=300$ mm 情况下激光输出功率随抽运电流的变化曲线

Fig. 7 Laser power as a function of the pump current ($L_1=2L_2, L_2=300$ mm)

光突然停止振荡。直到抽运电流继续增大到稳定区 B 的条件时,激光才恢复振荡。值得注意的是,在稳定区 B 即大电流时,电流还是从零开始增长的,虽然此时增长斜率稍大,但电光效率显然不如稳定区 A 小电流时的情况。在实际选取腔型时,由于在工作电流时,热透镜焦距都较大(一般在 300 mm 以上),因此就应该尽量取短腔长,使得激光器工作在稳定区 A 中,但是对于由于工作条件限制需要长腔长,或工作电流时热透镜焦距比较短的情况,也可以考虑选取腔长使激光器工作在稳定区 B。

4 结 论

本文运用高斯光束矩阵变换法对在动态热透镜影响下的谐振腔参数进行了分析和计算,讨论了动态热透镜效应作用下棒中心基模光斑的相应变化以及这种变化对激光输出的影响;通过分析计算得到了动态热透镜情况下激光腔稳定区范围的表达式,并给出了相应的实验验证。另外,还理论分析和实验验证了对称腔相对于非对称腔有更大的稳定

区和热稳定范围,为相应激光器的腔型设计提供了有益的参考。

参 考 文 献

- Xu Bijun, Lu Xuanhui, Xue Dajian *et al.*. The influence of laser output from the thermal-lens effect and the parameters of resonator [J]. *Optical Instrument*, 2002, **24**(4~5): 47~51
徐弼军,陆璇辉,薛大建等. 热透镜效应和谐振腔参数的选择对激光输出的影响 [J]. *光学仪器*, 2002, **24**(4~5): 47~51
- Shi Yan, Li Song, Chen Yihong. Resonator design optimization of high power laser diode side-pumped solid laser [J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(2): 74~76
石岩,李松,陈义红. 大功率激光二极管侧面泵浦固体激光器谐振腔的优化设计 [J]. *应用激光*, 2003, **23**(2): 74~76
- Yu Benhai, Zheng Qiguang, Tong Xinglin *et al.*. Analysis of two typical resonators for tow-rod Nd:YAG laser [J]. *J. Huazhong University of Sci & Tech* (Nature Science Editon), 2003, **31**(4): 96~98
余本海,郑启光,童杏林等. 两种典型双棒串接 Nd:YAG 激光器谐振腔的分析 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2003, **31**(4): 96~98
- W. Koehner. Solid-State Laser Engineering [M]. transl. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Beijing: Science Press, 1992
W. 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 孙文,江泽文,程国祥译,北京:科学出版社,1992
- Lü Baida. Laser Optics — Laser Beam Propagation and Beam Quality Control [M]. 2nd edition, Chengdu: Sichuan University Press, 1992
吕百达. 激光光学——激光束的传播变换和光束质量控制 [M]. 第二版,成都:四川大学出版社,1992
- Cui Jianfeng, Fan Zhongwei, Bi Yong *et al.*. Research on diode-pumped high beam quality dual-wavelength Nd:YAG laser [J]. *Laser Product World*, 2005, (2): 29~33
崔建丰,樊仲维,毕勇等. LD 抽运 Nd:YAG 高光束质量双波长激光器研究 [J]. *激光产品世界*, 2005, (2): 29~33
- Jiao Zhiyong, Zhang Guangyin, Zhang Xiaohua *et al.*. The thermal effect of laser diode side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2005, **38**(2): 1~4
焦志勇,张光寅,张晓华等. 激光二极管侧向泵浦的 Nd:YAG 激光器的热效应 [J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2005, **38**(2): 1~4
- Liu Junhai, Lu Jianren, Lü Junhua *et al.*. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers by a simple direct approach [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**(3): 181~183