

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0175-05

高功率高重复频率全固态激光器 热透镜效应补偿与分析*

马惠军, 孟俊清, 李小莉, 朱小磊, 陆雨田

(中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 将 kHz 高功率固体激光器增益介质当作厚透镜处理, 建立了热透镜效应分析的理论模型, 使用矩阵的方法对等效热透镜腔进行分析。对增益介质抽运均匀性进行了改善, 通过分析模拟计算结果, 设计了混合非稳腔结构, 选择了最佳凸面镜曲率半径对热透镜效应进行补偿。试验结果表明, 补偿效果明显, kHz 高功率全固态激光器的光束发散角优于 1.3 mrad。

关键词: 高功率固体激光器; 厚透镜; 热透镜效应补偿

中图分类号: TN 248.1

文献标识码: A

大功率高亮度的固体激光器是当前全固态激光器研究的前沿课题。无论从军事应用还是从工业应用来看, 不仅要求固体激光器具有大的激光输出功率, 同时, 还要求输出激光具有好的光束质量。在大功率高重复率固体激光器运转时不可避免的会出现热透镜效应, 热透镜效应已经成为国内外研究二极管抽运高功率固体激光器的一个热点。对热透镜补偿的方法通常是系统中加入补偿透镜、进行动态补偿和对工作物质端面进行处理进行补偿, 这些方法在小功率、低重复率的、对工作环境要求不高的固体激光器上取得了明显的效果。本文针对 kHz 高功率固体激光器热透镜效应进行建模分析, 跟以往研究工作不同的是本研究工作在对增益介质抽运均匀性进行改善的基础上, 将热透镜当作厚透镜进行处理, 设计了混合非稳腔结构, 并在此腔型条件下对热透镜效应进行模拟计算, 选择了最佳曲率半径对热透镜效应进行补偿。试验结果表明, 补偿结果明显, 基本达到了为实验设计提供理论依据的目的。

1 理论模型

固体激光器中激光棒的热透镜效应是十分复杂的, 它不仅具有随机变化的热扰特征, 而且还具有明显的热畸变特征和热应力引起的双聚焦现象。

1.1 厚透镜等效

以往分析激光棒的热透镜效应时, 常将激光棒简化为薄透镜。跟以往分析方法不同, 我们将激光棒当作厚透镜进行处理。图 1 为厚透镜的等效图。其中: n_1 为空气折射率; n_2 为工作物质的折射率; R_1, R_2 为厚透镜的曲率半径; l 为厚透镜的等效长度; h_1, h_2 为等效厚透镜的主平面位置。

我们从几何光学中光线传播的程函(Eikonal)方程出发, 使用矩阵的方法, 讨论在傍轴光线近似下光线的传播问题, 得到透镜变换矩阵以及主平面的位置和焦距大小^[1]。

1.2 等效热透镜腔参数

对应的透镜腔可以得到腔内单程变换矩阵, 光腔 G 参数、输出镜 M_1 处高斯光束光斑半径、镜 M_1, M_2 相邻的光腰大小

ω_1, ω_2 和光腰位置 L_1, L_2 (以镜 M_1 或 M_2 为参考), 以及当镜 M_1 为输出耦合镜, 激光远场发散角 θ_1 。

激光材料一方面吸收了抽运辐射而发热, 另一方面散热又要求对其表面进行冷却, 这两者使激光材料内部

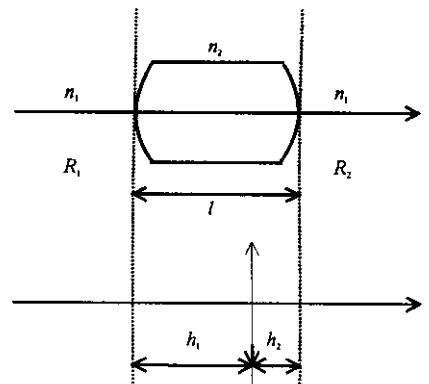


Fig. 1 Schematic of thick lens

图 1 厚透镜示意图

* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-01-20

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 马惠军(1975—), 女, 现为中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事高功率、高重复率全固态激光器的研究; 上海 800-211 信箱; E-mail: zhouchashiqq@163.com。

产生不均匀的温度分布。在激光棒中,主要的热畸变的扰动出现在端面附近,在温度和应力的作用下,棒折射率发生变化,考虑端面效应的影响,热透镜焦距表达式为^[2]

$$f = \frac{\sigma A}{P_a} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \kappa C_{r,\phi} n_0^3 + \frac{\kappa r_0 (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: A 为棒的截面; L 为棒的长度; P_a 为耗散功率;Nd:YAG 晶体的热膨胀系数 $\kappa = 7.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$;折射率 $n_0 = 1.82$;热导率 $\sigma = 0.14 \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$; C_r, C_ϕ 为 Nd:YAG 棒径向和切向光弹系数的函数,分别为

$$C_r = \frac{(17\nu - 7)p_{11} + (31\nu - 17)p_{12} + 8(\nu + 1)p_{44}}{48(\nu - 1)} \quad (2)$$

$$C_\phi = \frac{(10\nu - 6)p_{11} + 2(11\nu - 5)p_{12}}{32(\nu - 1)} \quad (3)$$

式中:光弹系数值 p_{11}, p_{12}, p_{44} 分别为 $-0.029, 0.0091, -0.0615$;对于 Nd:YAG 晶体,泊松比 $\nu = 0.25$ 。

2 模拟计算与结论

2.1 单 LDA 抽运模拟计算

由大量的理论和实践表明:激光棒的热畸变主要是由光泵对激光棒照射的不均匀性及激光的吸收不均匀性所引起的。当单个激光二极管抽运光线先后穿行石英、水和工作物质时都产生折射光线分布如图 2 所示,二极管单方向侧面抽运条件下,工作物质内增益分布很不均匀,这将使激光在谐振过程中产生严重的畸变,导致激光光束质量下降^[3]。

2.2 热焦距与耗散功率变化关系模拟计算

由等效热透镜腔分析可以看出,由于光弹系数函数存在径向和切向分量,激光棒相当于双焦透镜,为简化设计,将棒的径向热透镜焦距和切向热透镜焦距作综合取平均值当作等效热透镜焦距 f 。等效热透镜焦距 f 随耗散功率 P_a 变化的理论计算曲线如图 3 所示。

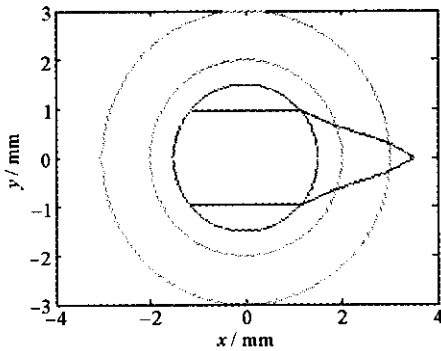


fig. 2 Schematic of ray distribution by single bar pumped

图 2 单个二极管抽运光分布

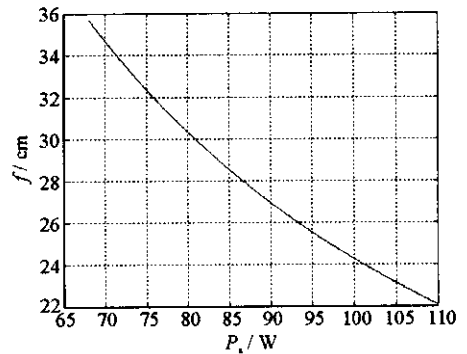


fig. 3 Thermal focal length as a function of heat dissipated in the rod

图 3 热透镜焦距随耗散功率变化曲线

3 热透镜效应补偿试验设计

3.1 抽运均匀性补偿设计

在 kHz 高功率固体激光器中为了避免光泵浦源对激光棒照射不均匀性以及激光吸收不均匀性,我们设计了 9 个 LDA 环绕在 Nd:YAG 棒($\phi 3 \text{ mm}$)周围的结构。

由于等间距环绕抽运用的激光二极管变多,在其他条件不变的情况下,工作物质中心处的增益变大,增益分布沿工作物质径向变化的趋势就越明显。这种增益分布能够较好地与激光谐振腔低阶模甚至与基模匹配,从而提高激光的光束质量。

鉴于高功率激光二极管的发光特性,由于所使用的 Nd:YAG 的直径较小,棒快轴方向上较大的发散角对抽运耦合效率影响较大,且二极管排列方向与工作物质的轴线相互平行,晶体轴向热分布可以看作是基本相同的,因此在这里只考虑棒横截面上的抽运光分布状况。我们设定快轴发散角为 40° ,慢轴发散角为 10° ,运用光线追迹法分析抽运光功率在工作物质横截面上的分布状况,其中每束光的发散方向都用 Monte-Carlo 方法确定,当光束经过一段距离 Δd 后,工作物质吸收的抽运光功率为^[4]

$$P = P_0 [1 - \exp(-\alpha \Delta d)] \tag{4}$$

式中： α 为工作物质吸收系数； P_0 为经过此区域前的抽运功率。图 4 为 9 个 LDA 抽运时，工作物质横截面上光功率分布图，由图可以看出，9 个 LDA 抽运光分布得到增强且更加均匀。

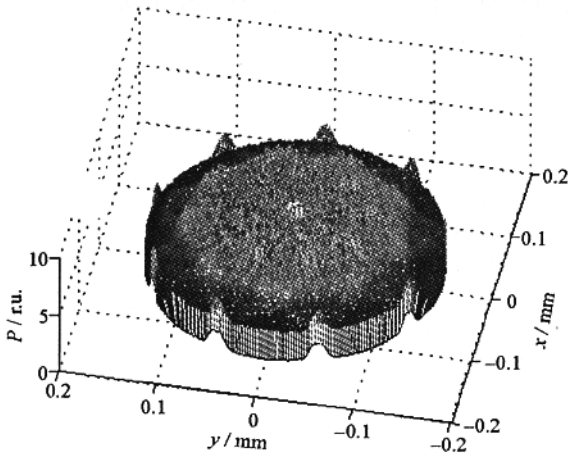


Fig. 4 Absorbed power distribution in Nd:YAG crystal
图 4 Nd:YAG 晶体棒横截面上光功率分布

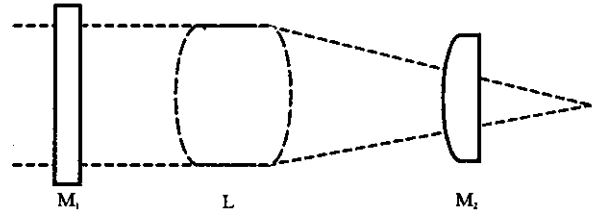


Fig. 5 Schematic of optical resonator
图 5 谐振腔示意图

3.2 谐振腔结构补偿设计

考虑激光棒热聚焦作用，设计谐振腔为：平-凸非稳腔结构，如图 5 所示。其中， M_1 为输出平面镜， L 为等效热透镜，焦距为 f ， M_2 为后向凸面反射镜。则 M_1 的曲率半径 R_1 为 ∞ 。由实际经验可知，平-凸腔存在着大范围的动力非稳区，为使激光器能在高功率、高重复率条件下长时间、稳定工作，就必须找到其动力稳区。此外，还考虑当 M_2 的曲率半径 R_2 取多少以及 L 与 M_1, M_2 之间的距离为多少时，激光腔进入动力非稳区的 f 值可以进一步缩短，输入的光抽运功率与输出功率均可以进一步增大。对于本课题项目的特殊性，即机载特性，这就要求激光谐振腔结构紧凑， M_1, M_2 之间的距离不可过长，同时，由于 M_1, L, M_2 之间还需介入其它光学元件，这就说明 M_1, L, M_2 之间距离不可能再有大的调整余地，因此，谐振腔的工作特性主要取决于 M_2 镜的曲率半径 R_2 。

通过计算，当抽运电流在一定值作较小范围变化时，可得 R_2 与光腔 G 参数 G_1, G_2 乘积的对应关系，计算结果表明，当凸面镜曲率半径 R_2 在 $-610 \sim -170$ mm 范围内取值时，谐振腔处于稳定态，输出基模光斑半径 $0.82 \sim 2.46$ mm。当抽运电流为 55 A 时，后腔镜曲率半径与基模光斑半径的关系如图 6 所示。

研究 R_2 与远场发散角 θ 之间的关系得到如图 7 所示的结果。当激光器稳定工作时，要求基模光斑半径大而远场发散角小以得到好的光束质量，综合考虑以上两者因素，经过分析实验结果，本文选择 R_2 为 -200 mm，此时激光器工作状态应较佳。

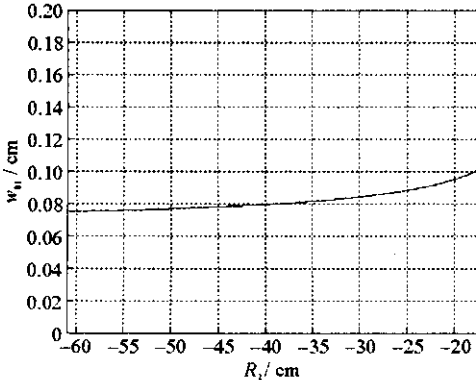


Fig. 6 Beam radius as a function of radius of the rear convex mirror
图 6 R_2 与基模光斑半径 w_{01} 的变化关系

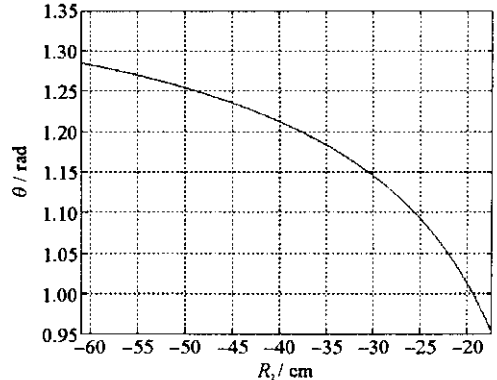


Fig. 7 Beam divergence as a function of radius of the rear convex mirror
图 7 R_2 与远场发散角 θ 之间的变化关系

4 试验结果与算法讨论

4.1 试验及结果

试验采用 Nd:YAG 棒为 $\phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$, 9 个 LDA 环绕抽运, 冷却系统采用水冷; LD 抽运最大功率 360 W (标称值), 抽运频率 1 kHz; 激光器谐振腔长度 230 mm, 试验使用的 R_2 为 -200 mm 。当抽运电流为 60 A 时, 远场发散角优于 1.3 mrad, 脉冲宽度小于 10 ns。采用的腔型与平-平腔作比较, 静态输出功率如图 8 所示。

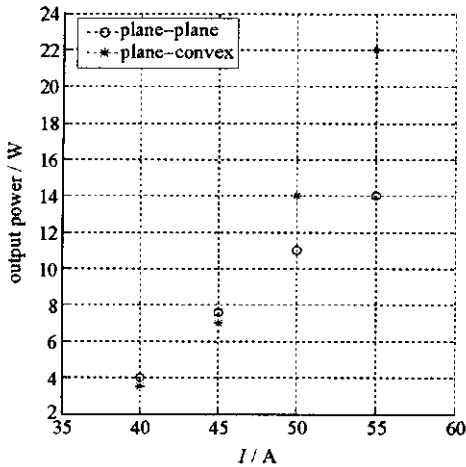


Fig. 8 Output power of plane-plane and plane-convex

图 8 平-凸腔与平-平腔输出静态功率对比

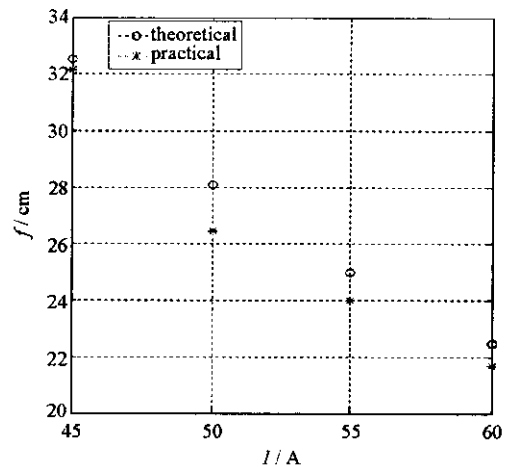


Fig. 9 Thermal focal length of theoretical and practical result

图 9 理论计算与实测热焦距值对比

由以上试验数据可以看出, 当抽运电流较小时, 热透镜效应不明显, 所采用的腔型输出功率与平-平腔相比没有优势, 但当抽运电流变大时, 热透镜效应变大, 未经补偿的腔型输出功率低于所采用的腔型, 可以看出, 采用 R_2 为 -200 mm 的平-凸腔对热透镜效应补偿作用明显。

4.2 算法讨论

将理论计算的热透镜焦距值与试验测得值相比较, 结果如下图 9 所示。此外, 当抽运电流为 60 A 时, 理论计算远场发散角为 0.92 mrad, 实测值略小于 1.30 mrad; 理论计算基模光斑半径 0.9 mm, 实测值 0.8 mm。

将以上数据分别进行对比分析, 我们可以看出理论值与实测值存在一定的差距, 分析可能产生这些差距的原因为: 理论计算使用的热焦距 f 为径向热焦距和切向热焦距的平均是否恰当, 实际试验与理论计算考虑冷却影响之间的差别, 当抽运电流增大时, 耗散功率与抽运功率是否还是按线性变化, 实际测量误差。这说明所采用的平-凸腔对热透镜效应补偿算法有待进一步研究。

5 结 论

本文针对 kHz 高功率固体激光器热透镜效应进行建模分析, 对增益介质抽运均匀性进行改善, 将热透镜当作厚透镜进行处理, 设计了平-凸腔, 在此腔型条件下对热透镜效应进行模拟计算, 选择了最佳曲率半径对热透镜效应进行补偿。试验结果表明, 热透镜效应补偿结果明显, 并能有效地提高激光器的输出功率。

参考文献:

- [1] 卢亚雄, 吕百达. 矩阵光学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989. 18—23. (Lu Y X, Lü B D. Matrix optics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989. 18—23)
- [2] 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 357—365. (Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing Science Press, 2002. 357—365)
- [3] 赵鸿, 姜东升, 王建军, 等. 二极管侧面抽运条件下工作物质增益分布特性研究[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 57—62. (Zhao H, Jiang D S, Wang J J, et al. Gain distribution characteristics in working medium side-pumped by diode bars. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1): 57—62)
- [4] Meng J Q, Chen W B, Hou X, et al. Comparison of different side-pumping configurations for high power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chin Opt Lett*, 2003, 1(9): 538—540.

Study on compensation of thermal lens in high power high repetition solid-state laser

MA Hui-jun, MENG Jun-qing, LI Xiao-li, ZHU Xiao-lei, LU Yu-tian
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,*
P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)

Abstract: A model which treated the active medium as a thick lens was established to analyze the effects of thermal lens in the resonator. By using the matrix method, the equivalent resonator performance was studied. The uniformity of pump energy distribution was improved. An unstable plane-convex resonant cavity with special parameters was designed based on the calculation result of thermal lens compensation. The optimum radius of the rear convex mirror was presented which could efficiently compensate the effect of thermal lens. A beam divergence less than 1.3 mrad was achieved.

Key words: High power solid-state laser; Thick lens; Compensation of thermal effect