

LD 端面泵浦的高重频 Nd:YAG 激光器的热效应研究

黄 峰, 汪岳峰, 牛燕雄

(军械工程学院 光学工程教研室, 河北 石家庄 050003)

摘 要:在 LD 端面泵浦的高重频 Nd:YAG 激光器的光泵浦过程中产生的热效应是影响激光输出特性和系统综合性能的重要因素。从热传导方程入手, 利用有限元法求得激光晶体中温度稳态分布的数值解, 同时对其热透镜效应进行了计算分析, 在此基础上运用传播圆—变换圆的图解分析法进行热稳腔的分离参数设计以补偿热透镜效应。该研究为进一步优化激光器设计, 提高激光输出的稳定性奠定了基础。

关键词:端面泵浦; 温度分布; 有限元; 热透镜效应; 热稳腔

中图分类号: TN248.1⁻³ **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)04-0358-04

Study on thermal effects of LD end-pumped high-repetition-rate Nd:YAG laser

HUANG Feng, WANG Yue-feng, NIU Yan-xiong

(Teaching & Research Section of Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The thermal effects of LD end-pumped Nd:YAG high-repetition-rate solid laser during the optical pumping are the important factor which affects the laser output characteristic and the system integrated performance. Starting with the thermal conduction function, the numerical value of temperature steady distributing in the laser crystal is found by the finite element method. And thermal lens effect is counted and analyzed. Then the separate parameters design of thermal insensitive cavity is processed to compensate the thermal lens effect by the propagation-circle and transform-circle graphic analysis and design method. The study establishes the base for optimizing the design of laser to improve the stabilization of laser output.

Key words: End-pumped; Temperature distributing; Finite element; Thermal lens effect; Thermal insensitive cavity

0 引 言

LD 泵浦的全固体激光器(DPSSL 或 DPSSL)具有结构紧凑、体积小、寿命长、效率高、运行可靠、损耗低等诸多优点, 被广泛应用于科学研究、光学信息处

理、光通信、彩色显示、医疗卫生、加工、激光测距等领域^[1]。目前, 高重复频率(工作重复频率 >1 kHz)的 DPSSL 在科研、工业、军事等领域得到越来越广泛的应用, 尤其是军用领域, 如在激光雷达、光电对抗中已成为其应用发展的关键技术之一。端面泵浦是中低功率 DPSSL 常用的一种泵浦方式, 具有结构紧凑、

收稿日期: 2003-09-03; 修订日期: 2003-11-10

作者简介: 黄峰(1979-), 男, 福建莆田人, 硕士生, 主要研究方向为激光技术与应用、光电对抗。

整体效率高和有利于得到好的空间模式(近于理想的 TEM₀₀ 模强度分布)的特点。由于受端面泵浦的几何限制,加之高功率泵浦光聚焦在激光晶体中心很小的体积内,使晶体热效应严重,有时还会出现体损伤和端面损伤。对 LD 端面泵浦的 Nd:YAG 高重复固体激光器中激光晶体的热效应进行计算分析,并对热效应的补偿尤其是谐振腔的优化设计进行了初步研究。

1 激光器

LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器系统结构及泵浦结构如图 1、图 2 所示,采用带光纤耦合输出 20 W 的连续 LD 泵浦、掺杂浓度为 1% 的 Nd:YAG 晶体,晶体棒直径为 3 mm,长 4 mm。谐振腔采用平凹腔设计,YAG 棒的一端镀对 808 nm 增透($T > 93\%$),对 1064 nm 高反射的膜($R > 99.7\%$),作为谐振腔全反射镜;另一端镀对 1064 nm 增透的膜($T > 99.7\%$)。凹面输出镜对 1064 nm 激光波长的透过率为 $T = 2\% \sim 10\%$,半径 $R = 100 \sim 500$ mm,声光 Q 开关通光孔径为 4 mm,腔长 50~90 mm。采用半导体制冷片和用于测 LD 环境温度的热敏电阻^[2]构成 LD 的制冷与温控系统,声光 Q 开关外加散热片,同时激光器外设

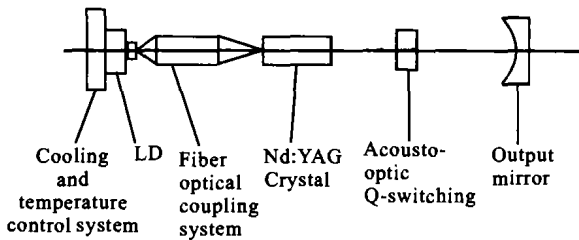


图 1 LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器结构图

Fig. 1 Frame chart of LD end-pumped Nd:YAG laser

风冷系统。对于高重复频率激光器件,若重复时间间隔较其工作物质的热弛豫时间短很多,可以有一个准热平衡过程,则可按照连续工作方式来处理^[3]。本文采用声光调 Q 激光器,工作频率为 1~20 kHz,采用

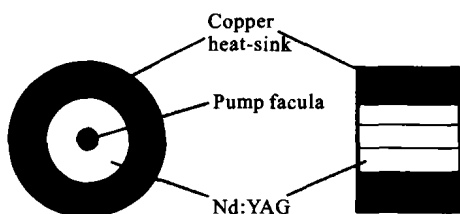


图 2 端面泵浦激光棒结构示意图

Fig. 2 Sketch map of end-pumped laser club structure

连续工作方式进行热效应分析。

2 温度分布

激光棒通过铜制热沉传导散热,热沉由风冷系统制冷。为简化分析,建立假设的理论模型:Nd:YAG 棒周围散热情况相同,侧表面具有固定温度,则当热导率为 K 的激光棒受到发热强度分布为 $q(r,z)$ 的热源作用时,其稳态温度分布 $T(r,z)$ 满足泊松方程:

$$-K \cdot \nabla^2 T(r,z) = q(r,z) \quad (1)$$

通常用高斯函数来近似表示半导体激光器的光强分布,假设棒内热源只有激光内跃迁损耗一种,则棒内热源函数也是高斯型的。假定泵浦能量在棒内以指数形式衰减,则热源函数 $q(r,z)$ 可表示为^[4]:

$$q(r,z) = \frac{2\alpha\eta P_{in} \exp(-2r^2/\omega_p^2 - \alpha z)}{\pi\omega_p^2} \quad (2)$$

式中 α 为激光晶体对泵浦光功率的吸收系数; η 为热转换系数; P_{in} 为入射泵浦功率; ω_p 为泵浦光功率 ($1/e^2$) 处的高斯光束半径。对于周边冷却的固体激光棒,其边界条件为^[5]:

$$\partial T / \partial r = 0 \quad r = 0 \quad (3)$$

$$T = T_h \quad r = R_0 \quad (4)$$

$$K(T - T_{\infty}) \mp h \partial T / \partial n = 0 \quad z = 0, L \quad (5)$$

式中 T_h 和 T_{∞} 分别为热沉和周围环境温度; $\partial T / \partial n$ 为在两个端面温度沿外法向导数; h 为激光棒端面对流换热系数。公式(5)在泵浦入射端面($z=0$)取‘-’,在出射端面($z=L$)取‘+’。

由于棒内温度分布具有轴对称性质,将其转化为平面域问题(其简化物理模型的网格剖分如图 3 所示),并借助 MATLAB 的偏微分(PDE)工具箱应用有限元方法(FEM)对其进行数值分析计算。

在 MATLAB (PDE) 中考虑稳态情况的椭圆热

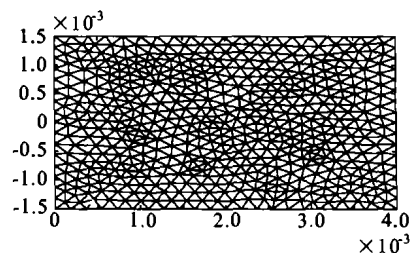


图 3 Nd:YAG 晶体内热传导模型的网格剖分图

Fig. 3 Grid map of Nd:YAG crystal heat exchange model

传导方程(Elliptic 型)^[5]:

$$-\nabla \cdot (K \nabla T) = Q + h(T_{\text{ext}} - T) \quad (6)$$

式中 Q 为热源, $Q=q(r, z)$; h 为热传递系数, 根据公式(1), $h=0$; T_{ext} 为外部温度, 对应 T 。计算中, 取 $K=13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\alpha=3.2 \text{ cm}^{-1}$, $\omega_p=400 \mu\text{m}$, $P_m=20 \text{ W}$ 。对波长为 808 nm 的 LD 抽运的 Nd:YAG 晶体, η 在 0.37~0.43 之间, 取中间值 $\eta=0.4$ ^[6]。在有限元分析时, 边界条件为:

(1) 激光棒侧面具有恒定温度 T_h , 满足 Dirichlet 型条件, 对应于传热学第一类边界条件, 即边界上的温度是给定的, 表示为:

$$h \cdot T = r \quad (7)$$

式中 h 为权重系数(PDE 计算程序定义); r 为温度。由公式(4)可得, $h=1$, $r=T_h$, 计算时 $T_h=310 \text{ K}$ 。

(2) 泵浦光入射端面和出射端面满足 Neumann 型, 对应于传热学二、三类边界条件, 表示为:

$$n \cdot (K \nabla T) + qT = g \quad (8)$$

式中 q 为热传递系数; g 为热流。对应公式(5)可得, $q=K$, $g=KT$, 计算时 $T=300 \text{ K}$ 。

图 4、图 5 为有限元分析的结果, 由于采用了简化的物理模型, 且求解的是稳态热传导方程的稳态数值解, 图中解的温度值通常会高于实际的瞬态测量值, 但对激光晶体内温度分布的分析结果并无实质影响。

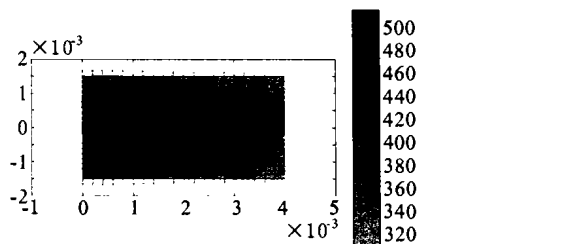


图 4 Nd:YAG 晶体内的色谱、等温线及热感应强度向量场图

Fig. 4 Chromatogram, isotherm and thermal induction vector field in the Nd:YAG crystal

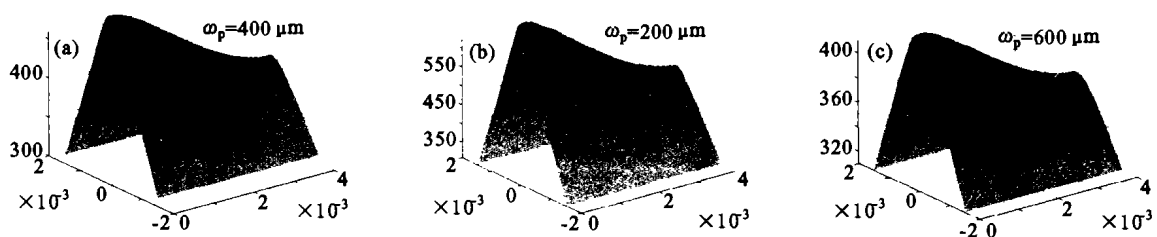


图 5 Nd:YAG 晶体内的色谱三维图

Fig. 5 Chromatogram 3-dimension in the Nd:YAG crystal

图 5(a)~(c)中的 ω_p 分别为 400、200、600 μm 时对应的计算结果。结果表明, 与侧面泵浦系统相比, 其热分布具有明显差异, 温度分布非常不均匀且十分复杂, 温度梯度由端面泵浦光斑中心向出射端面和激光棒侧面下降, 泵浦光斑越小, 棒内温度变化越剧烈, 温度场分布越不均匀。

3 热透镜效应

由端面泵浦激光晶体的温度分布引起的热透镜效应是光学谐振腔设计中的一个重要参量。热透镜效应由激光棒内的热不均匀分布(热梯度)与热应变光弹性引起的折射率不均匀变化形成。其中热不均匀分布引起的热透镜效应起主要作用, 热应变光弹性引起的热透镜焦距变化约占 20%, 而端面效应引起的弯曲影响小于 6%^[3]。在一级近似中只用与温度有关的折射率部分来描述热透镜效应, 假设与恒温散热器相连的棒内只有径向热流, 可推导出热透镜效应的有效焦距。修改参考文献[7]给出的热透镜焦距公式得:

$$f = \frac{K \pi \omega_p^2}{\eta P_m (dn/dT)} \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \quad (9)$$

式中 dn/dT 为折射率温度系数; α 为吸收系数。

在本文应用的 Nd:YAG 激光器中, 将 $dn/dT=7.3 \times 10^{-6} / \text{C}$, $\alpha=4.1 \text{ cm}^{-1}$, $\omega_p=400 \mu\text{m}$, $\omega_p=200 \mu\text{m}$, $\omega_p=600 \mu\text{m}$ 代入公式(9)得到 YAG 的热透镜焦距随泵浦功率变化的关系, 即泵浦功率越大, 热透镜焦距越小, 热透镜效应对激光器输出特性的影响越严重, 且越小的泵浦光斑引起的热透镜效应越严重, 如图 6(a)~(c)所示。

4 热透镜效应的补偿

固体激光器的光泵浦热效应限制了激光输出功率

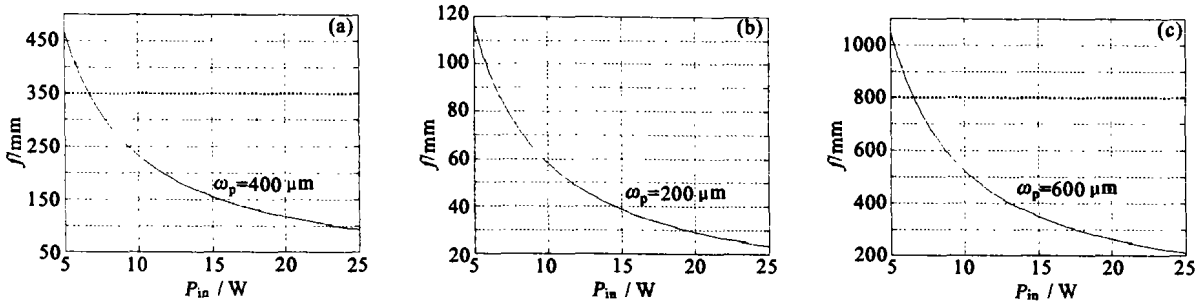


图6 Nd:YAG晶体的热焦距随泵浦功率变化

Fig. 6 Nd:YAG thermal focus as a function of pump power

率的进一步提高,并严重影响光束质量,因此必须采取适当的措施减小热效应。为实现对热透镜效应的动态补偿,通常采用热不灵敏腔(热稳腔)结构,保证激光棒的模体积及输出功率对泵浦功率起伏的稳定性^[6]。参考文献[8]提供了运用传播圆—变换圆的图解分析进行热稳腔的分离参数设计方法。本文研究的端面泵浦Nd:YAG激光器,其谐振腔采用平凹腔设计,有 $R_1 = \infty, l_1 = 0$ 。给出如下计算公式^[8]:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{b_i \lambda}{\pi}} \quad (10)$$

$$b_i = \frac{2l_2(l_2 - R_2)}{R_2} \quad (11)$$

$$d = \frac{2l_2(l_2 - R_2)}{2l_2 - R_2} \quad (12)$$

式中 ω_i 为热透镜处基模光斑尺寸; b_i 为热透镜处 π_i 圆直径; d 为热透镜处 σ_f 圆直径。由公式(11)、(12)求得:

$$l_2 = \frac{b_i d}{b_i - d} \quad (13)$$

$$R_2 = \frac{2b_i d^2}{b_i^2 - d^2} \quad (14)$$

由公式(10)得到:

$$b_i = \frac{\omega_i^2 \pi}{\lambda} \quad (15)$$

将公式(15)代入公式(13)、(14),得:

$$l_2 = \frac{\pi d \omega_i^2}{\pi \omega_i^2 - d \lambda} \quad (16)$$

$$R_2 = \frac{2\pi \lambda \omega_i^2 d^2}{\pi^2 \omega_i^4 - d^2 \lambda^2} \quad (17)$$

在热稳腔设计中,取 σ_f 圆直径等于实际的热焦距,即 $d = f_i$ 。根据上述计算结果,当泵浦功率为20W时,热透镜焦距 f_i 约为116mm($\omega_p = 400 \mu\text{m}$),热透镜处基模光斑尺寸取经验值 $\omega_i = 150 \mu\text{m}$ 。对所研

究的激光器,求得凹面输出镜的设计参数为 $l_2 = -156.9 \text{ mm}, R_2 = -199.2 \text{ mm}$,采用此热稳腔设计,即使不能完全实现热不灵敏条件,也可大大降低热透镜效应影响。

5 结束语

对LD端面泵浦的Nd:YAG高重频固体激光器在光泵浦过程中产生的热效应进行了深入的理论分析。从热传导方程入手,推导Nd:YAG晶体中的温度分布,并应用有限元法进行数值分析,计算求得其偏微分方程的数值解以模拟激光晶体内的温度稳态分布。同时对热透镜效应进行了计算分析,并在此基础上运用传播圆—变换圆的图解分析方法进行热稳腔的分离参数设计以达到补偿热透镜效应的目的,理论分析结果可为该类端面泵浦固体激光器的热效应研究及谐振腔优化设计提供一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 黄德修,刘雪峰. 半导体激光器及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1995. 197-210.
- [2] 刘宏伟. 激光二极管泵浦的固体激光器的理论与实验研究[D]. 天津:天津大学,1995.
- [3] 蔡伯荣. 激光器件[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1981. 209-254.
- [4] 余锦,檀慧明,钱龙生,等. 纵向固体激光介质热透镜效应的理论研究[J]. 强激光与粒子束,2000,12(1):27-31.
- [5] 苏金明. MATLAB6.1实用指南(下册)[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [6] 张玲,杨少辰,路绪鹏,等. LD端面泵浦Nd:YAG激光器的热效应研究[J]. 北方交通大学学报,2002,26(6):45-47.
- [7] W. 克希耐尔. 固体激光工程. 第五版[M]. 北京:科学出版社,2002. 405-409.
- [8] 张光寅,郭曙光. 光学谐振腔的图解分析与设计方法[M]. 北京:国防工业出版社,2003. 43-49,149-151.