

单端泵浦激光晶体温度分布的半解析热分析

李 隆¹, 史 彭², 白晋涛³

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安建筑科技大学理学院, 710055, 西安;
3. 西北大学光子学与光子技术研究所, 710069, 西安)

摘要: 针对目前数值分析法对光纤耦合激光二极管端面泵浦激光晶体温度场研究精确度不高的问题, 从解析分析理论出发研究了受到具有高斯分布的泵浦光端面入射的激光晶体内部温度场的分布情况, 建立了符合激光晶体工作状态的热模型. 通过热传导方程, 利用半解析方法对其进行了求解, 得出了激光晶体内部温度场分布的通解形式, 同时对影响激光晶体内部温度场分布的各种因素进行了研究. 研究表明: 当使用输出功率为 10 W 的二极管激光器端面泵浦掺钕钇铝石榴石晶体 (晶体掺钕离子的质量分数为 1.0%) 时, 在晶体端面获得了 49.1 的最大温升. 这种方法还可以应用到激光系统内的其他热问题研究中, 为有效地解决激光系统中的热问题提供了理论依据.

关键词: 端面泵浦; 激光晶体; 半解析方法

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)04 - 0369 - 04

Semi-Analytical Thermal Analysis of Single End-Pumped Laser Crystal Temperature Distribution

Li Long¹, Shi Peng², Bai Jintao³

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China; 2. School of Science, Xi an University of Architecture and Technology, Xi an 710055, China; 3. Institute of Photonics and Photo Technology, Northwest University, Xi an 710069, China)

Abstract: To improve the low precision of the numerical analysis method in research of diode laser end-pumping crystal interior temperature field, the analytical theory was introduced into describing laser crystal interior temperature field distribution characteristics caused by the pump laser with Gauss mode. A thermal model was built according to the actual working state. Based on the heat conduct equation, the general solution of laser crystal interior temperature distribution was obtained by the semi-analytical thermal analysis method. Some relevant parameters, which would influence temperature field distribution, were analyzed. The result shows that when the output power of diode laser is 10 W, the endface of 1.0% neodymium-doped yttrium aluminum garnet crystal can get 49.1 maximal relative temperature elevation. The method can also be used to analyze other thermal problems in laser systems, and supply a theoretical base for solving thermal problems in laser systems.

Key words: end-pump; laser crystal; semi-analytical analysis method

自 20 世纪 90 年代起激光二极管 (LD) 得到了迅猛的发展, 也使得 LD 泵浦的全固态激光器 (DPSSL) 成为当今激光领域的重要发展方向. 与传统的灯泵相比, DPSSL 具有体积小、重量轻、寿命长、稳定性好

等特点, 在医疗、通信、材料加工、娱乐和科学研究等领域都有广泛的应用^[1].

DPSSL 采用端面泵浦方式, 泵浦光可有效地进入激活介质的 TEM₀₀ 模体积内, 从而实现了泵浦光

收稿日期: 2003 - 06 - 19. 作者简介: 李 隆 (1972 ~), 男, 博士生, 现为西安建筑科技大学理学院讲师. 基金项目: 教育部“教育振兴行动计划”资助项目.

与振荡激光之间的模匹配^[2].当激光介质吸收泵浦光能量产生激光辐射的同时,有相当一部分泵浦光能量会转变为热能消耗于激光晶体内部^[3,4].晶体的外部使用半导体制冷或循环水冷却的方式使热量得以扩散,其结果是在激光晶体内部形成非均匀的温度梯度分布,这种分布对振荡的激光作用的效果可等效为一凸透镜^[5].激光晶体的热透镜效应直接影响激光器的性能^[6,7].

目前对激光晶体的温度分析已有很多^[8,9],但这些研究在方法上或数学处理上都存在一定的缺陷^[10].半解析热分析是国际上近几年出现的一种新方法^[11,12],它既有解析法的准确度,又有较宽的适用范围.本文通过对单端泵浦激光晶体的分析,建立了符合工作条件下激光晶体的动态温场模型,并通过热传导方程和边界条件,得出了激光晶体内部温度场的半解析解,同时分析了各种参量对温度场的影响,所得出的结论对单端泵浦的全固态激光器的设计具有重要意义.

1 激光晶体温度分布的数学模型和半解析理论计算

1.1 端面泵浦激光晶体实验结构及热模型建立

激光二极管端面泵浦全固态激光器有直腔结构、V型折叠腔结构、Z型折叠腔结构、环形腔结构等.图1给出了4镜Z型折叠腔激光器的实验装置图^[13],其中M1、M2为平面镜,M3为双月透镜,M4为平凹反射镜.

激光晶体的冷却结构大致相同,即根据激光晶体的尺寸设计紫铜环,通过循环水冷却或半导体模块对紫铜环进行冷却.严格控制循环冷却器或半导体器件的控温模块,使紫铜环周边温度保持恒定,其简化的晶体热模型如图2所示,其中 $z=0, z=L$ 分别为激光晶体的两个端面.

为了分析端面泵浦的激光晶体内部温度场分布状态,建立了轴向加热、边缘恒温的圆柱形晶体的热模型.激光晶体热模型的建立基于以下几个条件.

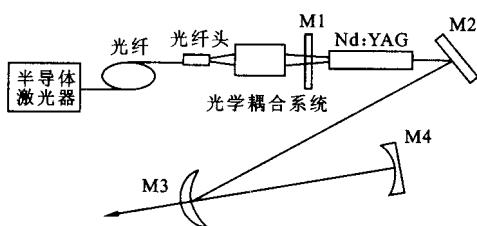


图1 单端泵浦折叠腔激光器的实验装置图

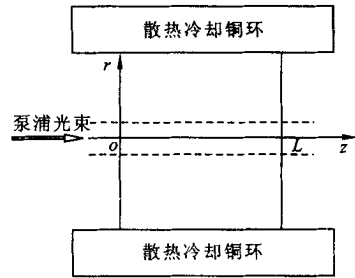


图2 单端泵浦激光晶体热模型简图

(1) 由于二极管激光器输出光束的光强分布较为复杂,许多文献的处理方法是将其视为具有均匀强度分布的平行平面光,但是严格地讲,用高斯光束近似更为合理^[5,10].假设泵浦光为平行于坐标系 z 轴的高斯光束,入射到 $z=0$ 面时,光强 $I(r)$ 的分布为

$$I(r,0) = I_0 \exp(-2r^2/w^2) \quad (1)$$

式中: I_0 为泵浦光强度; w 为泵浦高斯光束的半径; r 为激光晶体中某点到中心轴的距离.

泵浦光束经耦合系统入射到晶体 $z=0$ 端面的功率为

$$P = \int_0^w I_0 \exp(-2r^2/w^2) 2\pi r dr \quad (2)$$

可以得出

$$I_0 = \frac{P}{2 \int_0^w \exp(-2r^2/w^2) r dr} \quad (3)$$

激光晶体对泵浦光的吸收系数为 α ,当平行于 z 轴的泵浦光传播时,其光强由于被晶体吸收而减弱,在晶体 $z=z$ 面的光强为

$$I(r,z) = I_0 \exp(-2r^2/w^2) \exp(-\alpha z) \quad (4)$$

由于晶体荧光量子效应和内损耗吸收泵浦光的能量远大于其他原因晶体吸收的能量,因此仅考虑晶体由于荧光量子效应和内损耗吸收泵浦光的能量^[10].在 $z=z$ 面由于晶体吸收能量而产生的热功率密度为

$$q_v(r,z) = \alpha I(r,z) = \alpha I_0 \exp(-2r^2/w^2) \exp(-\alpha z) \quad (5)$$

式中: $\eta = 1 - \rho_{sp}/\rho_{1s}$ 为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数,其中 ρ_{sp} 为激光二极管激光器的波长, ρ_{1s} 为谐振腔的振荡激光波长.

(2) 由于激光晶体的冷却环采用紫铜制造,而紫铜的热传导系数远远大于激光介质的热传导系数(铜的热传导系数是掺 Nd^{3+} 晶体的30多倍),因此热量主要沿激光晶体的横向以辐射状向外传导,可

以假设沿热流径向 (r 方向)^[5,10] 传导. 晶体在主动冷却环境下,侧面的温度保持恒定,设定为 u_w . 作为热模型数学处理可设为 0(相对),得出温度场后,再叠加冷却环境温度,即 $u(a, z) = 0$.

(3) 晶体的两个通光面与空气相接触,从两端面和空气热交换流出的热量远远小于从晶体侧面通过传导流出的热量,因此可假设晶体的两端面绝热,即

$$\left. \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \quad (6)$$

1.2 晶体内部热传导方程及半解析解

由于激光晶体内部有热源,则晶体内部的热传导遵守 Poisson 方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + q_v = 0 \quad (7)$$

式中: q_v 为热功率密度,即单位体积内的发热率;为晶体导热系数或称为热导率. 在建立的热模型中,泵浦光源、激光晶体内部热源均具有轴对称性,其温度场与 θ 无关,即 $u(r, \theta, z) = u(r, z)$.

方程(7)的半解析解可以根据数理方程求解,其表达式为

$$u = - \frac{I_0}{r} \exp(-z) \left[\ln \frac{r}{R} \int_0^r \exp(-z^2/w^2) dz + \int_0^R \exp(-z^2/w^2) \ln \frac{r}{R} dz \right] \quad (8)$$

式中: w 为激光晶体内部的热源半径; R 为激光晶体的半径.

2 激光晶体的温度场分析

Nd: YAG 晶体是目前应用于二极管激光器泵浦的最为广泛的激光晶体之一. 对于掺杂浓度 1.0% 的 Nd: YAG 晶体,其吸收系数为 9.1 cm^{-1} ,热传导系数为 $13 \text{ W/(m} \cdot \text{K}^{-1})$ ^[14].

图 3 给出了 Nd: YAG 晶体内部温度场的三维分布图. 其中二极管激光器的泵浦功率为 10 W,泵浦高斯光斑半径 $w = 0.45 \text{ mm}$,激光晶体半径 $R = 1.5 \text{ mm}$,晶体的通光长度 $L = 8 \text{ mm}$,晶体内部的最大温升为 49.1 $^{\circ}\text{C}$.

图 4 给出了在相同条件下 Nd: YAG 晶体内部的等温线分布图. 从图中可以看出,靠近轴和泵浦源一端的温度比其他地方明显高出很多. 这种局部温场的升高会引起晶体对于谐振激光折射率的改变,影响激光器输出的稳定性.

图 5 给出了在不同泵浦功率下 Nd: YAG 晶体中截面 $z = L/2$ 处的温度对比图(其他条件不变). 由图可以看出,不同泵浦功率在晶体内部形成的温度场

分布不同,泵浦功率越高,晶体内部温场的分布就越不均匀,伴随温升产生的热效应也就越明显.

图 6 给出了泵浦功率为 15 W 时, Nd: YAG 晶体中截面 $z = L/2$ 处的温度对比图(其他条件不

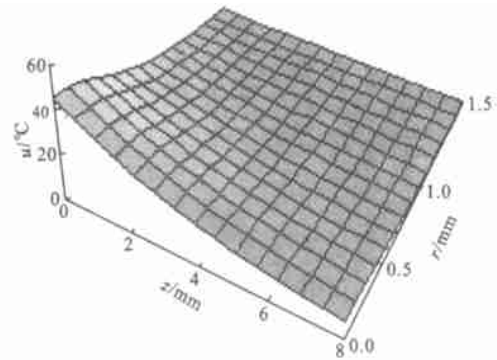


图 3 单端泵浦激光晶体三维温度场图

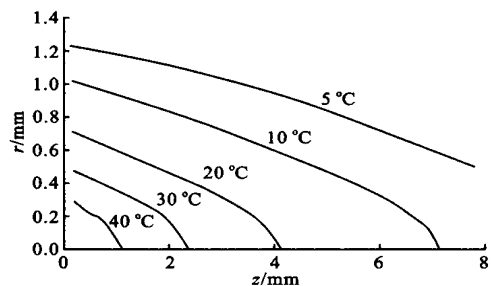


图 4 单端泵浦激光晶体内部等温线分布

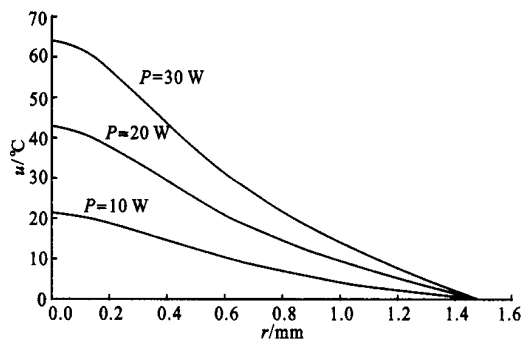


图 5 单端泵浦不同功率下晶体内部温度对比图

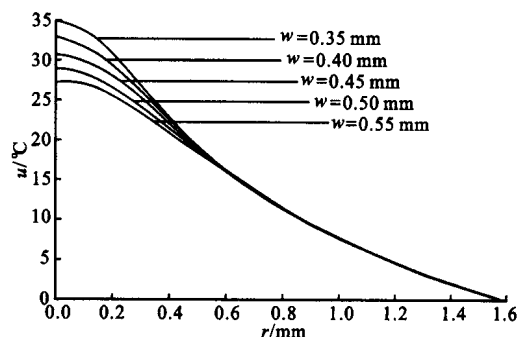


图 6 不同泵浦光斑下晶体内部温度对比图

变).由图分析可知,要使端面泵浦的固体激光器获得高质量的 TEM_{00} ,泵浦光与激光介质内的基模要在空间上实现模式的匹配^[15].图6的结果对研究谐振腔的模式匹配具有一定的指导意义.

3 总 结

本文分析了单端泵浦激光晶体的实际工作状态,利用半解析热分析方法得出了单端泵浦 Nd:YAG 晶体温度场的半解析数值解的表达式,计算并绘制出晶体的温度场分布图,并分析了各种参量对温度场分布的影响.本文的研究方法和得出的结果具有一定的普适性,可以应用到具有轴对称形式内热源的其他热模型温度场的计算分析中.

参考文献:

- [1] Fan T Y, Byer R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24(6): 895 ~ 912.
- [2] Laporta P, Brussard M. Design criteria for size optimization in diode-pumped solid-state laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 1991, 27(10): 2 319 ~ 2 326.
- [3] Fan T Y. Heat generation in Nd: YAG and Nb: YAG [J]. IEEE J Quantum Electron, 1993, 29(6): 1 457 ~ 1 459.
- [4] 张行愚,赵圣之,王青圃,等.激光二极管抽运的激光器热透镜效应的研究[J].中国激光,2000,27(9): 777 ~ 781.
- [5] Innocenzi M E, Yura H T, Frucher C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state lasers [J]. Appl Phys Lett, 1990, 56(19): 831 ~ 833.
- [6] 郑加安,赵圣之,王青圃,等.稳腔固体激光器运转时热透镜焦距的测量[J].中国激光,2001,28(8): 717 ~ 720.
- [7] Agnesi A. Design and characterization of a diode-pumped, single longitudinal and transverse mode intracavity doubled CW Nd: YAG laser [J]. Appl Opt, 1997, 36(3): 597 ~ 601.
- [8] Farruch U O, Buocristiani A M, Byvik C E. An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods [J]. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24(11): 2 253 ~ 2 264.
- [9] Cousins A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28(4): 1 057 ~ 1 069.
- [10] 余 锦.纵向泵浦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.
- [11] John N F, Meng ũ M P, Tagavi K A, et al. A semi-analytical method to predict printed circuit board package temperatures [J]. IEEE Trans on CHMT, 1992, 15(5): 675 ~ 684.
- [12] 史 彭,陈雅妮,王占民.多层圆形组件半解析热分析方法的研究[J].电子学报,2001,29(8): 1 121 ~ 1 122.
- [13] Bai J T, Chen G F. Continuous wave diode laser end pumped Nd: YVO4 / KIP high power solid-state green laser [J]. Optic & Laser Technology, 2002, 34(4): 333 ~ 336.
- [14] Henrich B, Bei G R. Self-starting kerr-lens mode locking of a Nd: YAG laser [J]. Optics Commun, 1997, 135(4-6): 300 ~ 304.
- [15] 刘均海,吕军华,卢建仁,等.高功率端面抽运 Nd: YVO4 固体激光器模匹配的研究[J].光学学报,2000, 20(2): 186 ~ 189.

(编辑 刘 杨)

(上接第 368 页)

参考文献:

- [1] Yamada T, Mochizuki A, Sawada J, et al. Experimental evaluation of a UHA tower model for lightning surge analysis [J]. IEEE Trans PD, 1995, 10(1): 393 ~ 402.
- [2] Hara T, Yamamoto O. Modelling of a transmission tower for lightning surge analysis [J]. IEEE PGID, 1996, 143(3): 283 ~ 289.
- [3] 邱毓昌,施 围,张文元.高电压工程[M].西安:西安交通大学出版社,1995.
- [4] 解广润.电力系统过电压[M].北京:北京水利电力出版社,1985.
- [5] 杨瑞棠.广州蓄能水电站 500 kV 变电站雷电入侵波的保护[A].2000 年电气学术交流会议论文集[C].北京:中国水利水电出版社,2000.

(编辑 杜秀杰)