

文章编号: 1001-3806(2005)05-0543-03

LD 端面抽运激光介质热效应的有限元分析

陈子伦, 马厉克, 姜宗福*, 曹润秋

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院 定向能技术研究所, 长沙 410073)

摘要: 针对激光介质的通光面为方形、抽运光为高斯光束的情况, 以 Nd:YAG 激光介质为例, 用 ANSYS 有限元软件模拟了激光介质的热效应, 精确地给出了激光介质中各点的温度和温度分布。分别对提高介质侧面对流换热系数、降低冷却液温度、抽运端面水冷这 3 种情况下的温度场进行了模拟。结果表明, 通过提高晶体侧面的热对流换热系数和降低冷却液温度, 几乎不能降低激光介质的热效应, 而通过抽运端面水冷, 可有效地降低激光介质的热效应。

关键词: 热效应; 有限元分析; 端面抽运; Nd:YAG**中图分类号:** TN241 **文献标识码:** A

Finite element analysis of thermal effect of LD end-pumped laser medium

CHEN Zi-lun, MA Li-ke, JIANG Zong-fu, CAO Jian-qiu

(Institute of Directed Energy Technology, Photoelectric Science and Engineering School, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the case of square end faces of the medium, focused Gaussian beam pumping, temperature field of laser medium end-pumped by laser diode (LD) has been studied by using finite element methods. The temperature and its distribution in the medium, such as Nd:YAG, are determined. At last the temperature field at the condition of improving the convective heat coefficient of medium's surface, reducing the coolant temperature or cooling the pumped face of rod is simulated. The results indicate that it hardly fall the thermal effects by improving the convective heat coefficient of medium's surface and reducing the coolant temperature, but it can reduce the thermal effects virtually by cooling the pumped face of rod.

Key words: thermal effects; finite element methods; end-pumped; Nd:YAG

引言

大功率激光二极管端面抽运固体激光器具有体积小、抽运功率高的优点, 而且抽运光用光纤耦合时可以实现抽运源与激光器的有效分离, 因而有广泛的应用前景, 近年来成为人们研究的热点。大功率激光二极管抽运激光器在医疗、通信等领域的广泛应用要求激光器基模运转, 那么抽运光主要集中在晶体的中央部位, 由于晶体吸收抽运光功率有很大一部分转换成热能储存在晶体内部, 使得晶体内部温度分布不均匀, 因此引起热效应。大功率激光器中, 晶体的热效应是激光系统设计的主要因素之一, 控制晶体的温度以减少热效应, 从而使激光器稳定运转成为研究的重点。

目前, 对端面抽运固体激光器激光介质的热效应分析主要集中在棒状晶体^[1-4], 并且都是在不考虑能量的轴向传播、激光棒端面的空气对流传热、晶体的热传导系数为常数的近似计算^[3,4]。而采用有限元法则

能详细考虑能量的三维传播、端面空气对流的影响、热传导系数随温度的变化等等。作者首先利用前人的结果检验了所用有限元的准确性, 接着对激光介质的通光面为方形、抽运光为高斯光束的情况, 以 Nd:YAG 激光介质为例, 用 ANSYS 有限元软件详细模拟了激光介质的热效应。

1 理论分析

热导率为 κ 的固体激光介质受到发热强度为 $q(x, y, z)$ 的热源作用时, 稳态热传导方程为:

$$\nabla^2 T(x, y, z) + q(x, y, z)/\kappa = 0 \quad (1)$$

激光介质表面的边界条件可由牛顿冷却定律表示, 即:

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \bigg|_s = h(T_c - T|_s) \quad (2)$$

式中, 冷却液的温度是 T_c , $T|_s$ 是激光介质表面 S 的温度, n 是激光介质表面法线方向, h 是激光介质表面热对流换热系数。高斯型抽运光在激光介质中的热源分布为^[1]:

$$q(x, y, z) = \frac{2\alpha\eta P_{in}}{\pi w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2} - \alpha z\right) \quad (3)$$

式中, α 是激光晶体对抽运光功率的吸收系数, η 是由荧光量子效率和内跃迁损耗决定的热转换系数, P_{in} 代

作者简介: 陈子伦 (1978-) 男, 硕士研究生, 主要从事激光器中的热效应研究。

* 通讯联系人。E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-07-19; 收到修改稿日期: 2004-10-20

表入射抽运功率, w 是高斯光束半径。

不考虑端面空气对流换热和晶体中能量轴向传播的温度表达式^[1,3]为:

$$T(r, z) = T(r_0, z) + \frac{\alpha \eta P_{in} \exp(-\alpha z)}{4\pi\kappa} \times \left[\ln\left(\frac{R^2}{r^2}\right) + E_1\left(\frac{2R^2}{w^2}\right) - E_1\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) \right] = T(r_0, z) + \frac{\alpha \eta P_{in} \exp(-\alpha z)}{4\pi\kappa} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n \cdot n!} \left(\frac{2R^2}{w^2}\right)^n \left[\left(\frac{r}{R}\right)^{2n} - 1\right] \quad (4)$$

对于激光棒半径为 1.5mm、抽运高斯光束半径为 0.45mm、入射抽运功率为 10W、Nd:YAG 晶体的导热系数取为 13W/(m·K) 的端面温度值, 见图 1。为了验证 ANSYS 模拟时的准确性, 模拟时也不考虑晶体能量的轴向传播和端面空气对流换热, 结果见图 2(其中取晶体侧面温度 $T(r_0, z) = 0^\circ\text{C}$)。

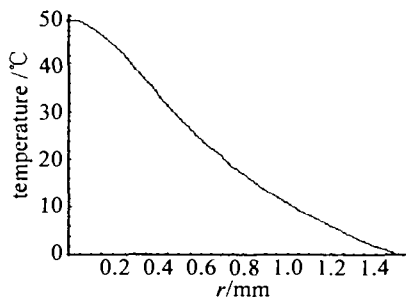


Fig. 1 Temperature distribution along r axes at pumped-face by analytic solution

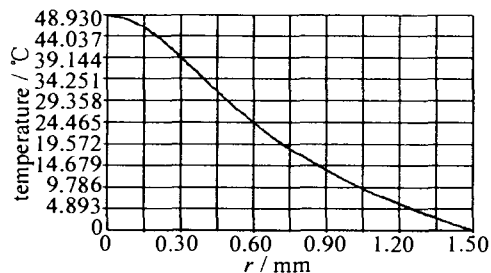


Fig. 2 Temperature distribution along r axes at pumped-face by ANSYS simulation

由图 1 和图 2 可看出, 在相同的条件下, 解析的结果和数值模拟的结果完全符合。下面将在考虑能量轴向传播和端面空气对流情况下对通光面为方形、抽运光为高斯光束的激光介质的热效应进行详细模拟。

2 有限元模拟

运用有限元分析软件 ANSYS 对基本参数如表 1

Table 1 The parameters used in ANSYS simulation

YAG geometrical parameters	3mm × 3mm × 4mm
absorption coefficient	9.1/cm
pump power	10W
Gaussian beam waist	0.225mm
heat conversion coefficient	0.24
heat-transfer factor of laser medium at edge	$h = 5000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
heat-transfer factor fo air	$27.5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
temperature of air	290K

所示的 Nd:YAG 激光介质进行温度场模拟。晶体划分的网格大小为 0.06mm × 0.06mm × 0.2mm, 对于划分更小的网格并不能改变计算结果。

其中介质的导热系数随温度的关系式如下^[2]:

$$\kappa(T) = \frac{1.88 \times 10^8}{[\log(5.33T)]^{7.14}} - \frac{32000}{T} \quad (4)$$

当晶体侧面冷却液的温度 T_c 控制在 290K、两端面与空气接触时, 得到的温度场模拟见图 3 ~ 图 5。



Fig. 3 Temperature distribution in the laser medium

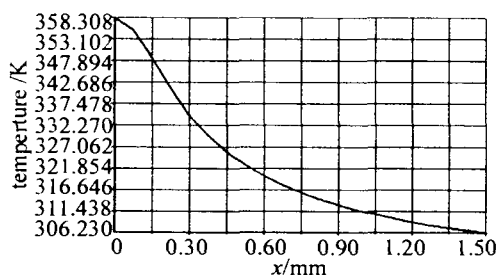


Fig. 4 Temperature distribution along x axes at pumped-face

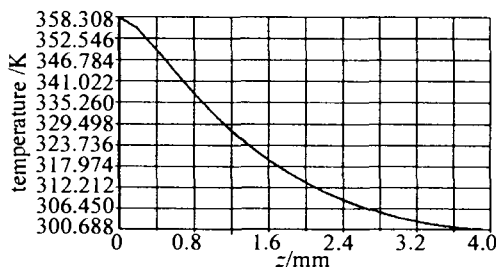
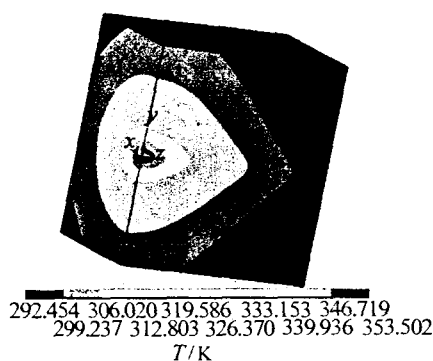
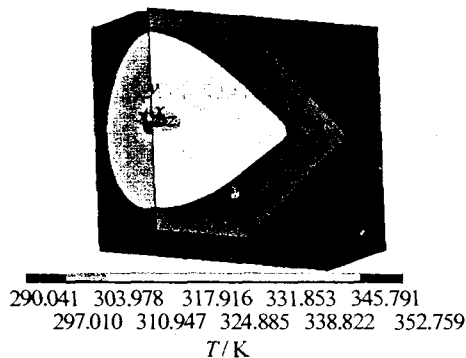


Fig. 5 Temperature distribution along z axes at pumped-face

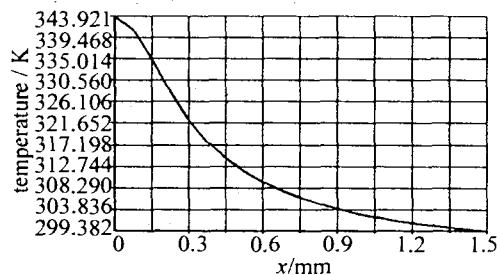
模拟结果中可看出, 抽运端面温度梯度变化最大, 端面中心温度是 358.309K, 端面轴线边缘温度是 306.230K, 温差为 52.079K。

在其它条件不变的情况下, 为减小热效应分别采用高的晶体表面与冷却液的对流换热系数(即 $h = 8000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) 和降低冷却液的温度(即 $T_c = 285\text{K}$) 时, 得到介质内温度场的分布情况如图 6、图 7 所示。

从图 6 可以得到晶体端面中心温度降到 353.502K 和端面轴线上温度差为 52.064K。通过图 7 得到端面中心温度降到 352.759K 和端面轴线上温度差为 51.561K。由此可以看出, 通过提高晶体表面与

Fig. 6 Temperature distribution in the laser medium $h = 8000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ Fig. 7 Temperature distribution in the laser medium at $T_c = 285 \text{ K}$

冷却液的热对流换热系数 h 以及降低冷却液的温度,可以降低晶体内温度的分布,但是对于温度梯度来说基本上没有发生变化,端面轴线上温度差都为 52K 左右,可见通过改变热对流换热系数 h 和冷却液温度不能有效地改善晶体内温度场分布的不均匀性。

Fig. 8 Temperature distribution along x axes at pumped face after pumped-face cooled

然而在抽运光入射端面上进行水冷的情況下,温度场模拟如图 8 和图 9 所示(其中水流冷却的热对流换热系数为 $5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)。从图 9 中可以得到

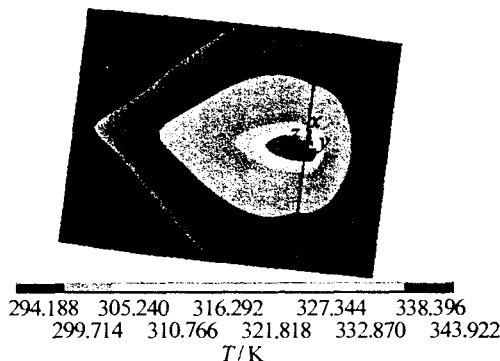


Fig. 9 Temperature distribution in the laser medium after pumped-face cooled

端面中心温度为 343.921K,端面轴线边缘温度是 299.382K,故温差变为 44.539K,通过数据可以看到,通过端面冷却不仅可以降低晶体的温度值,还能有效地降低温度的不均匀性,从而减少了晶体热效应。

3 结 论

对端面抽运的 Nd:YAG 晶体的热效应进行了详细的有限元模拟。通过提高晶体侧面的热对流换热系数和降低冷却液温度可以降低晶体的温度值,但是几乎不对温度梯度产生影响,然而通过抽运端面水冷后,不仅降低了温度值,还减少了温度的不均匀性,从而能有效地降低了晶体的热效应。

参 考 文 献

- [1] 余 锦,檀慧明,钱龙生 *et al.* 纵向抽运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):27~30.
- [2] BROWN D C. Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers [J]. IEEE J Q E,1998,34(12):2383~2392.
- [3] 张 玲,杨少辰,路绪鹏 *et al.* LD 端面抽运 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.
- [4] 李 隆,史 彭,白晋涛. 单端抽运激光晶体温度分布的半解析热分析 [J]. 西安交通大学学报,2004,38(4):369~372.
- [5] 高功率侧面抽运 Yb 掺杂双包层光纤激光器 [J]. Opt Commun,2000,186:311~317.
- [6] KOPLow J P,MOORE S W,KLINER D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. IEEE J Q E,2003,39(4):529~540.
- [7] XU J Q,LU J H,KUMAR G. A non-fused fiber coupler for side-pumping of double-clad fiber lasers [J]. Opt Commun,2003,220:389~395.
- [8] WEBER T,LUTHY W,WEBER H P. A longitudinal and side-pumped single transverse mode double-clad fiber laser with a special silicone coating [J]. Opt Commun,1995,115:99~104.
- [9] 韦文楼,欧 攀,阎 平 *et al.* 双包层光纤的侧面抽运耦合技术 [J]. 激光技术,2004,28(2):116~120.
- [10] HIDEUR A,CHARTIER T,ZKUL C. Dynamics and stabilization of a

(上接第 534 页)

镜脱落的现象。如果采用微棱镜在光纤的多个位置进行胶合,可以把数瓦的抽运光耦合进入双包层光纤的内包层中,这种方法可用于实施输出功率在几十毫瓦到几瓦的双包层光纤激光器和放大器的侧面抽运。

参 考 文 献