

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0121-04

# 高功率薄片激光介质温度与应力数值模拟\*

涂 波, 蒋建锋, 周唐建, 崔玲玲, 姚震宇

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** Nd:YAG 薄片激光介质采用上表面二极管阵列泵浦, 下表面冷却的工作方式, 对 Nd:YAG 薄片激光介质和 Cu 冷却器建立了理论计算模型。分别计算了在不同泵浦面积条件下薄片的温度分布和应力大小, 薄片泵浦面积大小与应力的关系, 以及在 Nd:YAG 薄片与 Cu 冷却器之间增加与 Nd:YAG 热膨胀系数相近的介质层材料对应力影响的关系。计算结果表明: 在泵浦功率密度、外界温度和冷却条件一致的情况下, 泵浦光泵浦整个薄片时总体应力最小, 应力主要是由于 Nd:YAG 薄片与 Cu 冷却器热膨胀系数不匹配而产生的, 增加介质层能改变应力大小; 泵浦光泵浦部分薄片时总体应力较大, 应力主要是薄片泵浦区与非泵浦区温差造成的, 与介质层无关。

**关键词:** Nd:YAG; 应力; 介质层; 数值模拟

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

随着二极管激光器及其固体激光器技术迅速发展, 高功率二极管泵浦固体激光器在工业、科研等领域显示了越来越大的应用前景<sup>[1~3]</sup>。Nd:YAG 薄片激光器设计可以允许介质具有高的泵浦功率密度而不产生显著的温度梯度, 合理的设计可以使薄片径向温度分布近似均匀, 从而大大降低介质的热透镜效应和热致应力双折射, 也防止了薄片因热应力过大而导致断裂。薄片激光器可以定标放大到很高的平均功率。研制薄片激光器最为关键的技术之一就是薄片的散热冷却技术, 解决好此技术能有效减小薄片应力, 是防止薄片断裂的关键。

我们通过对薄片激光介质温度与应力的数值模拟, 掌握到目前影响薄片应力大小的因素, 提出了能合理改善应力分布的方法。

## 1 计算模型的建立

Nd:YAG 薄片激光器主要由二极管阵列、Nd:YAG 薄片激光介质以及冷却系统组成。计算模型如图 1 所示。Nd:YAG 薄片上表面是泵浦区, 通过二极管阵列进行泵浦。下表面通过铜焊接在铜微通道冷却器上, 以通冷却水方式对薄片进行冷却。调节二极管阵列发出的泵浦光的角度和高度就会使泵浦在介质上的泵浦区的面积和位置发生变化, 而这种变化就直接导致激光介质内部温度梯度的不同, 从而使介质内部产生不同大小的应力。

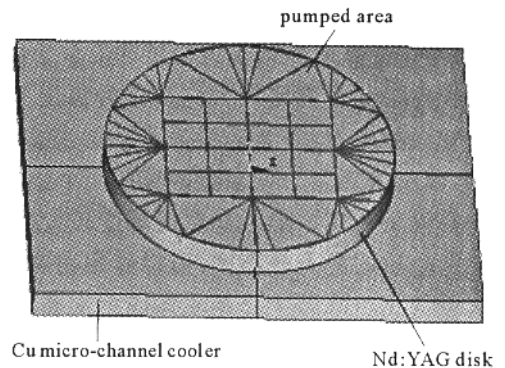


Fig. 1 Model of Nd:YAG disk laser  
图 1 Nd:YAG 薄片激光器模型

## 2 模拟分析

模拟二极管阵列泵浦薄片激光介质的过程, 通过对 Nd:YAG 薄片作热分析可以直观的看出薄片各部分的温度以及应力、应变情况。

对于单面冷却的薄片介质, 允许吸收的最大热功率为<sup>[3]</sup>

$$P_{\max} = 3RBS/l \quad (1)$$

式中:  $R$  是 Nd:YAG 的热冲击参数, 为  $11 \text{ W/cm}$ ;  $b$  为安全工作系数, 设计为  $0.5$ ;  $S$  为泵浦区面积;  $l$  为薄片厚

\* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-03-25

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 涂 波(1980—), 男, 绵阳人, 本科, 研究实习员, 主要从事光学理论计算以及高功率二极管泵浦激光器技术研究; 绵阳 919-1013 信箱; E-mail: tbo715@163.com.

度,为 1 mm。 介质吸收泵浦光功率所产生的热功率为

$$Q = \eta_{co}\eta_a\eta P \tag{2}$$

式中: $P$ 为二极管激光器阵列输出的最大平均泵浦功率,为 252 W; $\eta_{co}$ 为泵浦耦合系统的耦合效率,经测量约为 85%; $\eta_a$ 为薄片对泵浦光的吸收效率,经计算约为 80%; $\eta$ 为 Nd:YAG 介质的产热比, $\eta=0.32$ 。

调节泵浦光以及快慢准直透镜,使泵浦光以  $30^\circ$  入射角泵浦薄片介质,泵浦面积约为  $7.5\text{ mm}\times 6.2\text{ mm}$ ,模拟假设二极管阵列均匀泵浦薄片介质,计算得到热功率密度为  $1.3\text{ W/mm}^2$ 。Nd:YAG 薄片尺寸  $\phi 13\text{ mm}$ ,厚度 1 mm。薄片前表面为泵浦面,后表面通过钢焊接在铜热沉上。铜微通道冷却器通冷却水温度为  $20^\circ\text{C}$ 。

根据以上条件模拟计算了在热功率密度和冷却条件相同时,泵浦区域为  $7.5\text{ mm}\times 6.2\text{ mm}$  和泵浦区域为整个薄片上表面的应力改善状况。在 Nd:YAG 薄片激光介质和铜热沉之间增加适当厚度的介质层,在一定条件下能够改善激光介质的应力分布,从而起到减小介质应力的作用。模拟设计在激光介质和铜热沉之间采用复合金刚石(CD)作为介质层。比拟其它可作为介质层的物理材料,复合金刚石因为具有高强度、较高的热传导系数以及稍小于 Nd:YAG 的热膨胀系数,从而作为介质层的首选材料。

表 1 是 Nd:YAG 激光介质和介质层复合金刚石(CD)的部分物理参数。

表 1 Nd:YAG 和 CD 的物理参数  
Table 1 Parameters of Nd:YAG and CD

material	coefficient of thermal expansion/ $\text{K}^{-1}$	thermal conductivity/ $(\text{W}\cdot\text{K}^{-1})$	specific heat/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	specific gravity/GPa	Young's modulus/TPa
Nd:YAG	$7.7\times 10^{-6}$	0.013	0.59	4.56	0.28
CD	$4.6\times 10^{-6}$	0.6	0.19	4	0.84

为此,分别模拟了泵浦区域为  $7.5\text{ mm}\times 6.2\text{ mm}$  和泵浦区域为整个薄片上表面的两种情况来分析泵浦区域的变化对于介质层应力的改善情况。

### 2.1 泵浦区域 $7.5\text{ mm}\times 6.2\text{ mm}$

当二极管激光器阵列泵浦在 Nd:YAG 薄片激光介质上的区域为  $7.5\text{ mm}\times 6.2\text{ mm}$  时,介质的温度分布情况如图 2 所示。泵浦光泵浦在激光介质的中心位置,造成介质中心温度比较高,由于激光介质的热传导系数比较低,使热量不能较快传导到介质的非泵浦区域和下表面的铜热沉上面去,由于泵浦区域的关系,不仅使介质内部轴向温度梯度较为明显,也造成了介质内部的径向温度梯度比较大。在这种情况下,激光介质内部就会产生较大的应力,图 3 为激光介质热应力的分布图。如图所示,激光介质的热应力在泵浦区域的四个边角上最为明显,而此应力主要就是介质内部径向温度梯度较大造成的。图 3 为增加介质层后介质的应力分布图,可以看出在这种泵浦条件下,介质的应力并没有因为介质层的增加而得到改善,造成这种情况的原因主要是主体应力主要是由介质内部温差产生的。

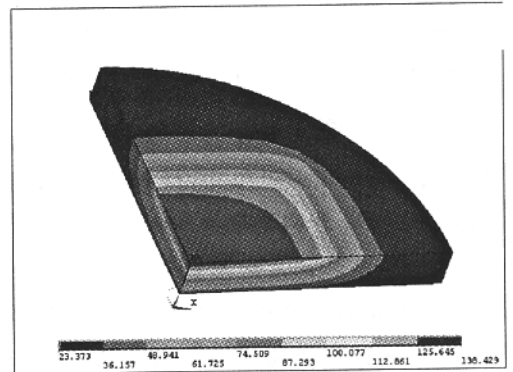


Fig. 2 Temperature distribution of Nd:YAG

图 2 Nd:YAG 温度分布

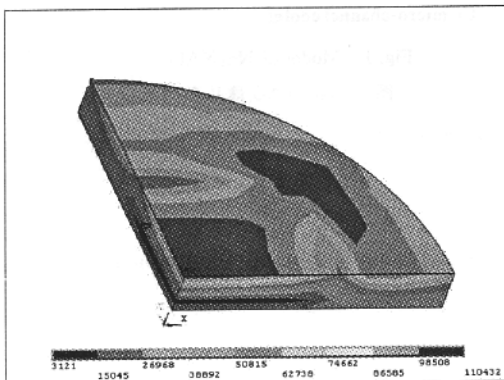


Fig. 3 Stress distribution of Nd:YAG

图 3 Nd:YAG 应力分布图

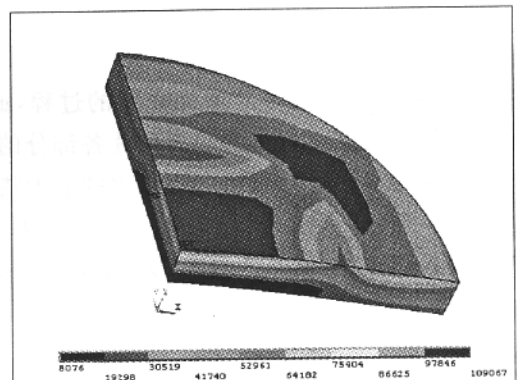


Fig. 4 Stress distribution of Nd:YAG with medium

图 4 增加介质层时 Nd:YAG 应力分布图

## 2.2 泵浦区域为激光介质上表面

当二极管激光器阵列泵浦在 Nd:YAG 薄片激光介质上的区域为整个薄片激光介质时,由于模拟计算时设定泵浦介质的热功率密度相同,因此介质的泵浦面就没有温差产生,相比泵浦部分区域的情况,消除了介质内部径向应力,从而减小了整体应力。图 5 是此种情况下的温度分布图。图中可以看出,介质内部只存在轴向的温度差,比较泵浦部分区域介质中心的轴向最大温差,两者的温差几乎相等。由此可以判定两种情况由轴向温差产生的应力相差不大。图 6 是完全泵浦激光介质的应力分布图,相比前一种情况,最大应力减小了很多,而最大应力区发生了改变,出现在介质的下表面边缘处。增加介质层的应力分布见图 7,与不加介质层相比,介质的最大应力有所减小,此时使用介质层有减小应力的效果。这是因为不使用介质层时激光介质和铜热沉是直接焊接,铜的热膨胀系数相对于激光介质来说比较大,在它和介质共同受热膨胀时,由于铜膨胀较快,使介质和铜之间产生的应力的方向与介质受热膨胀的方向一致,加剧了介质的膨胀,使介质总体应力大于添加热膨胀系数较小材料制作的介质层时的应力。而使用复合金刚石(CD)的介质层,由于其热膨胀系数不大,在和激光介质一起受热膨胀时,金刚石膨胀很慢,因为焊接关系也阻碍了介质的膨胀,这样就在它和介质之间产生了与介质膨胀方向相反的应力,方向不同的两种应力相互抵消,起到了使介质的总体应力减小的作用。

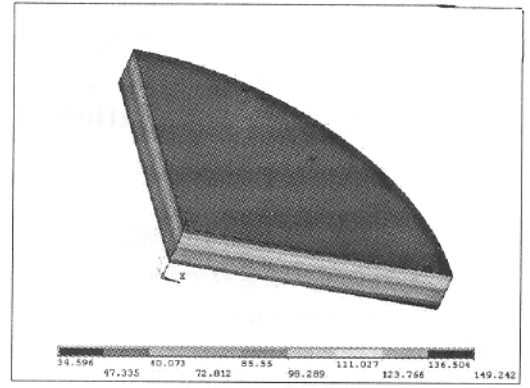


Fig. 5 Temperature of Nd:YAG pumped area  
图 5 泵浦区为整个表面时 Nd:YAG 温度分布

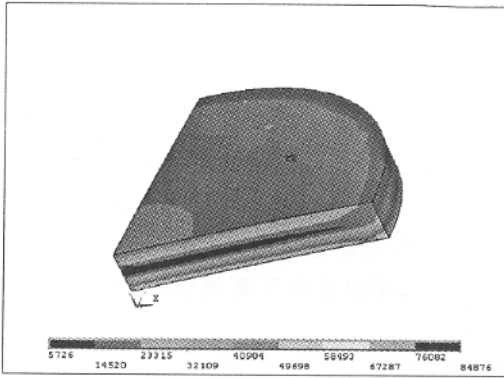


Fig. 6 Stress of wholly pumped Nd:YAG disk  
图 6 泵浦区为整个表面时 Nd:YAG 应力分布

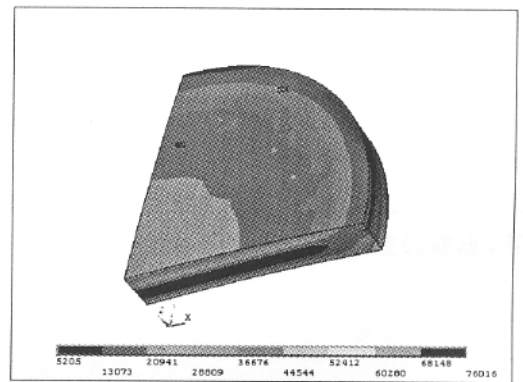


Fig. 7 Stress of pumped Nd:YAG disk with compound diamond medium

图 7 泵浦区为整个表面时加了介质层的 Nd:YAG 应力分布

## 3 结论

在冷却条件和泵浦光产生的热功率密度一致的情况下,泵浦 Nd:YAG 薄片激光介质面积的不同能使介质内部的应力有很大的改变。泵浦薄片面积  $7.5 \text{ mm} \times 6.2 \text{ mm}$  时应力较大,泵浦整个薄片上表面时应力减少了近 30 MPa,减小幅度达 23%,多余的应力是薄片泵浦区与非泵浦区径向温差造成的。完全泵浦 Nd:YAG 薄片激光介质上表面,此时能有效减小薄片激光介质应力,能有效防止薄片断裂。泵浦薄片整个上表面时,增加热膨胀系数较 Nd:YAG 稍小的材料(复合金刚石)作为介质层改善了激光介质的应力分布,并能起到减小介质应力的作用。从而较好地解决了薄片激光介质的热应力问题,为激光介质安全稳定工作提供了坚实的理论依据。

## 参考文献:

- [1] 姚震宇,吕百达,高剑蓉,等. 高功率二极管泵浦腔内倍频激光器[J]. 强激光与粒子束,2003,15(10):963—965. (Yao Z Y, Lü B D, Gao J R, et al. High power diode-pumped intracavity-double laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(10):963—965)
- [2] 王卫民,姚震宇,庞毓. 百瓦级绿光 DPL 激光器技术研究[J]. 强激光与粒子束,2004,16(1):5—7. (Wang W M, Yao Z Y, Pang Y. Study on DPL technology of hectowatt green laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(1):5—7)

- [3] 姚震宇,吕百达,涂波,等. 100W 二极管泵浦 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 强激光与粒子束,2004,16(9):1116—1118. (Yao Z Y, Lü B D, Tu B, et al. 100W diode-pumped Nd:YAG disk laser. *High Power Laser and Particle Beams*,2004,16(9): 1116—1118)
- [4] Vetrovec J. Active mirror amplifier for high-average power[A]. Proc of SPIE[C]. 2001,4270:45—55.

## Numerical simulation of medium temperature and stress for high power disk laser

TU Bo, JIANG Jian-feng, ZHOU Tang-jian, CUI Ling-ling, YAO Zhen-yu

(*Institute of Applied Electronics,CAEP,P. O. Box 919-1013,Mianyang 621900,China*)

**Abstract:** This paper presents the numerical simulation of the Nd:YAG disk as the high power laser medium. The upper surface of the disk is pumped by the diode array, and the other side is cooled by copper heat sink. Temperature and stress are simulated for the disk partly pumped by an area of  $7.5\text{ mm}\times 6.2\text{ mm}$  as well as pumped from its whole surface. The results show that with the same pumping power intensity, environment temperature and cooling, the overall stress of the disk fully pumped is smaller than that of the partly pumped disk. As the former is mainly caused by the difference of thermal expansion between the disk and the copper heatsink, it reduces when the compound diamond is used as a medium. While the latter, which is mainly caused by the temperature difference between the pumped and non-pumped area, changes little with the compound diamond medium.

**Key words:** Nd:YAG; Stress; Medium; Numerical simulation