

文章编号: 1001-3806(2003)03-0248-03

## LD 侧泵浦 Nd YAG 板状介质温度特性的理论研究<sup>\*</sup>

方爱平 楼祺洪 董景星 魏运荣 李铁军

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

**摘要:** 利用有限差分法对 LD 侧面泵浦 Nd YAG 板状激光器介质的二维温度分布进行了数值计算。与用热像仪实际测得的结果比较, 温度变化趋势吻合。根据计算结果重新设计激光晶体的冷却方案, 改善了温度的分布, 光束质量因子  $M^2$  从 6.7 减小到 3, 提高了激光输出的光束质量。

**关键词:** 有限差分法; 侧面泵浦; 板状激光介质; 温度分布

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

### Theoretical study on the temperature characteristics of LD side-pumped Nd YAG laser slab

Fang Aiping, Lou Qihong, Dong Jingxing, Wei Yunron, Li Tiejun

(Shanghai Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800)

**Abstract:** The temperature distribution of LD pumped Nd YAG laser slab is calculated by using finite difference method. The calculated results show that the temperature distribution is related to the cooling structure and in agreement with the measured distribution attained by IR camera. By improving the cooling structure, the  $M^2$  of laser beam is reduced from 6.7 to 3 with better temperature distribution.

**Key words:** finite difference method; LD side pumped; Nd YAG slab laser; temperature distribution

## 引言

LD 泵浦的固体激光器(DPSSL)相对于闪光灯泵浦而言, 具有很多优点, 如总效率高; 寿命长; 能量损耗较低, 热负载较少; 频率和输出功率稳定性高; 重量较轻, 体积较小等等, 这些使得 DPSSL 成为现在研究领域的一大热点。而得到较大的激光输出功率和相应较好的光束质量, 是人们研究的主要目的。

在 DPSSL 的几种泵浦方式中, 横向泵浦(即侧面泵浦)相比于纵向泵浦, 最大的优点就是有较高的激光输出功率。但是, 使用侧面泵浦, 付出的代价是光束质量的下降。激光器运转时, 介质会吸收一部分泵浦光能量而发热。同时又因外部冷却使热扩散, 在介质内形成一定的温度梯度<sup>[1]</sup>。虽然工作稳定的谐振腔, 在高输出功率时也可得高光束质量, 可是这种非均匀温度场及相应的热聚焦作用, 可能会导致冷腔状态下的处于稳区的谐振腔失稳, 而影响

激光光束质量和激光平均功率的提高, 成为实现大功率化时的最终限制因素之一。于是为了获得最佳的激光输出, 就需要采取有效的冷却手段, 首先就要了解激光介质内的温度特性, 并找到合适的测量温度特性的方法。

从理论上计算了实验的冷却条件下, LD 侧面泵浦板状 Nd YAG 激光器的介质平面内的温度分布情况, 并与实验中热像仪测量出的结果进行比较, 变化趋势吻合得较好。根据计算结果, 给出了改善冷却的方案, 有利于提高输出激光的光束质量。辜建辉<sup>[2]</sup>等人曾使用过热像仪测量棒状激光介质的温度分布, 但用热像仪对板状激光介质做测量, 并进行理论计算以指导进一步的实验, 这还属首次。

## 1 理论计算

泵浦光源 LD 位于激光介质 Nd: YAG 板一側面的中部, 紧贴介质。实验时在除泵浦面的 3 个侧面上包上铜块热沉, 并分别采用循环水和自然空气冷却。以泵浦侧面为坐标系的  $x=0$  面, 以激光出射方向为  $z$  轴, 坐标系原点取在激光出射截面上泵浦源一侧的棱的中点处。认为泵浦在  $z$  向均匀, 温

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目。

作者简介: 方爱平, 女, 1976 年 11 月出生。硕士研究生。从事 LD 泵浦固体激光器的研究。

收稿日期: 2002-05-14; 收到修改稿日期: 2002-08-27

度分布也在  $z$  向均匀,所考虑的就是激光出射面上温度的 2 维分布情况。这个面上介质板的尺寸为  $5\text{mm} \times 3\text{mm}(x \times y)$ ,板周围铜块的尺寸为  $7\text{mm} \times 16\text{mm}(x \times y)$ ,其中顶部的铜块距 YAG 板  $2\text{mm}(y$  方向)。于是,可以建立 LD 侧面泵浦固体激光器的模型,如图 1 所示。

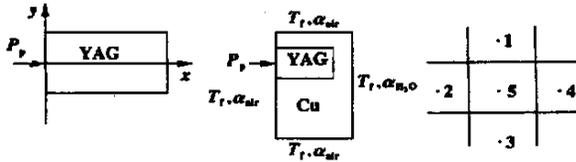


Fig. 1 LD-pumped Nd YAG laser model

泵浦电流稳定后,导热区域内空间点的温度基本不再随时间变化,则可采用稳态导热的有限差分法计算温度分布。将激光介质板平面及周围铜块热沉的侧面一起作为考虑的对象,在其中选取足够多的节点。研究所有节点的特性,来代替整个平面的特性。选取的各个节点(如图 1 中点 1,2 等)间分别在  $x, y$  方向上等距离,介质平面边缘上的节点位于平面的边界棱上。如图 1 所示为节点选取示意图。标出与每个节点有关的物质体积(也就是处于节点温度的物质,如点 5 所在的方框区域),作为一个控制体,然后对其应用能量守恒定律:进入控制体的所有形式的能量 + 控制体内本身所产生的能量 = 流出控制体的所有形式的能量 + 控制体内贮存能量的变化。用简化的形式重写为:

$$R_i + R_g = R_o + R_s \quad (1)$$

对于固体板和周围流体间的相互作用,采用牛顿冷却定律:

$$Q_c = h_c \cdot (T_f - T_0) \quad (2)$$

泵浦源,即内热源项为:

$$R_g = \dot{q}_0 \frac{V}{2} = \dot{q}_0 \frac{V}{2} = \frac{Pf(x, y)}{V} \frac{V}{2} \quad (3)$$

两种固体介质 Nd YAG 和 Cu 间的热传导量:

$$Q_{n0} = \frac{T_n - T_0}{R_{n0}} \quad (4)$$

式中,  $Q$  为导热量(W),  $h$  为固体的导热系数( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ),  $\dot{q}_0$  为单位体积的热功率密度( $\text{W}/\text{m}^3$ ),  $P$  为泵浦功率(W),  $h_c$  为流体的表面换热系数( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ),  $R$  为热参数。 $T_f$  为环境流体温度(K),  $T_n$  为周围节点的温度(K),  $T_0$  为节点处的温度(K)。  $V$  为控制体的体积,  $\Delta x$  为节点间的步长(m),  $\Delta x$  和  $\Delta y$  方向的步长相等  $\Delta x = \Delta y$ 。

对于单面侧泵板条情况,假设在  $y$  方向上泵浦光成高斯分布,而在  $x$  方向上为正常的吸收衰减,那么泵浦光配分函数可写做<sup>[3]</sup>:

$$f(x, y) = e^{-2y^2/w^2} e^{-x^2} \quad (5)$$

式中,  $w$  为束腰,  $\alpha$  为介质吸收系数。于是在本实验的条件下,对于任何一个节点有:

$$h_i \cdot (T_f - T_0) + \frac{Pf(x, y)}{V} \frac{V}{2} + \frac{T_n - T_0}{R_{n0}} = 0 \quad (6)$$

式中,  $h_i$  表示节点周围各个面所接触的流体,具体分别指空气和循环水;  $n$  表示所考虑的节点周围的相关节点,如图 1 中节点 5 的相关节点为 1,2,3 和 4。对应于不同的固体,分别为 Cu 和 YAG。

根据上述算法,在实验的边界条件下列出每一个节点满足的式子,得到若干个联立的代数方程。方程数目与所选取的节点数相同。据此编制了 MATLAB 程序,进行数值计算。得到所需考虑的介质平面内各节点的温度值。计算参数如下:激光介质各参数对应于 Nd YAG,  $Cu = 386\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ , 泵浦光实际功率  $P = 6.8\text{W}$ ,  $\alpha = 0.4$ ,  $\tau = 9.1\text{cm}^{-1}$ <sup>[4]</sup>,  $R_{n0} = 0.5 \times 10^{-3}\text{m}$ ,  $T_f = 18^\circ\text{C}$ ,  $w = 1\text{mm}$ 。

## 2 结果及讨论

### 2.1 介质板内的温度分布

图 2a 根据计算得到的温度值,给出了介质侧面的温度分布情况。纵横坐标值分别表示在  $x, y$  方

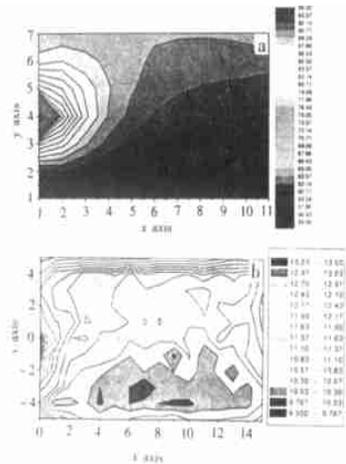


Fig. 2 The temperature contour in  $x$ - $y$  plane of Nd YAG slab  
a—theoretical b—experimental,  $I = 20\text{A}$

向所选取的节点序号。利用所选取的所有节点的温度来代替考虑整个介质平面内的温度。介质的上下及后表面均使用铜块进行冷却,后表面的铜块再与循环水相接。介质平面内的温度以泵浦源为中心成辐射状分布,高温区集中在光照射表面附近。这种温度分布规律与笔者在实验中用热像仪的测量结果<sup>[5]</sup>相吻合,如图 2b。由于实际测量的局限性,热

像仪图片显示的是平面内各点的相对温度值。相对温度值指实际温度与某一热常数(比辐射率,与介质有关)的比值。为方便,作图时使用相对温度值。将介质板均分成  $x$  方向 18 份,  $y$  方向 11 份,图中  $x, y$  的位置均指相对于坐标原点的份数值。等温图周围出现的畸变,主要是由于在具体实验中激光介质周围包了形状不规则的铜片薄膜,以及介质本身可能的不均匀性造成的。

可见,利用红外热像仪拍摄的温度分布图片比较直观和真实地反映了实际的效果。

编程计算中也发现,对于后部冷却铜块厚度不同的激光介质板,其温度分布也会不同。当介质板后部的铜块较厚时,冷却较充分,于是与底部的差异较小,整体冷却更趋向均匀。这就进一步证实了介质板上下表面的温度分布呈明显不对称趋势的原因,主要是由于下部的铜块较厚,冷却充分,上部的铜块相比较薄,后部的铜块虽然也较薄,但是由于使用了循环水对流冷却,使得冷却也较上部充分。据此,实验中可以选尺寸更为适当的热沉铜块,以改善激光介质的温度特性。

### 2.2 冷却对激光光束质量的影响

根据计算结果中的温度变化趋势,实验中重新选取了一种冷却方案,加厚使用的热沉块。于是,除泵浦侧面和激光出射面上,激光介质板的上下表面及后侧面均使用厚度为 1cm 的铜块,铜块外接循环冷却水。见图 3。

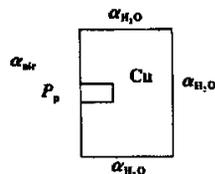


Fig. 3 The better cooling structure

用前面介绍过的有限差分法对这个冷却改进后的模型进行理论计算,计算中所使用的激光介质 Nd:YAG 的特性参数不变,冷却水温度也同样保持为 18。并用红外热像仪对所考虑的平面进行观测摄像,相应的条件也和冷却改善前相同。得到冷却改善后的等温图如图 4a,图 4b。可以看出,较原来冷却方案(图 2a,图 2b),平面内上下的温度分布明显变得对称。说明选择厚的铜块比薄的铜块有利于降低激光介质板的温度。这样的温度分布也有助于进行热透镜补偿。但是,介质板中间部分的温度仍旧相对较高,主要是因为激光介质板的长宽比还不够大,介质板相对还不够薄,铜块热沉还未将板的内部彻底冷却。若选用长宽比更大的介质板,温度分布将更加均匀。实验图相对于理论图的畸变,同样是由于铜块周围的铜片薄膜,以及介质板本身的不均匀性造成的。

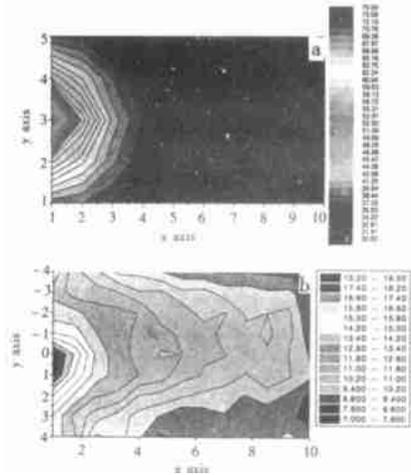


Fig. 4 The temperature contour in  $x-y$  plane of Nd:YAG slab at better cooling structure  
a—theoretical b—experimental,  $I = 20A$

当输出激光功率相当时,在图 1 的冷却条件下,测得激光的光束质量  $M^2 = 6.7$ 。改进冷却条件后(见图 3),同样方法测得光束质量  $M^2 = 3$ ,光束质量明显提高。当激光介质板内的温度分布不均匀时,介质各处的折射率分布也变得不均匀,于是形成一种热透镜效应,使得原本稳定的激光谐振腔变成非稳状态。激光介质也成为一种非均匀的介质,激光在其中各处受的影响就变的不均匀,导致光束质量变差。冷却条件改进后,板内的温度分布趋向均匀,于是可以看到出射激光的模式特性明显变好。

### 3 结论

从理论上给出了实验冷却条件下,激光介质板内的 2 维等温图。温度以泵浦源为中心呈辐射状分布。周围铜块热沉的厚度直接影响冷却的效果。理论计算值和实验测量值吻合得较好,也进一步表明了红外热像仪测量温度的可行性,以及理论计算方法对冷却方案指导的正确性。根据计算结果改进冷却条件后,激光介质内的温度分布趋向均匀,提高了激光的光束质量。但是,由于激光介质板不够薄,冷却效果还不是很完善,有待进一步的改进。

感谢中科院上海技术物理研究所吴常咏和施家明老师在热像测量方面的帮助。

### 参考文献

- [1] 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992: 276 ~ 291.
- [2] Gu J H, Tam S Ch, Lam Y L et al. Chinese Journal of Lasers, 2001, B(10): 50 ~ 56.
- [3] Pfistner C, Weber R, Weber H P et al. IEEE J Q E, 1994, QE30: 1605.
- [4] Buach U, Schuberr M. Opt Commun, 1995, 117: 116 ~ 122.
- [5] 方爱平, 楼祺洪, 董景星 et al. 中国激光, 2002, A(29): 1 ~ 3.