

·光电器件与材料·

## 螺纹型激光晶体热透镜效应研究

赵振宇, 聂劲松

(电子工程学院, 合肥 安徽 230037)

**摘要:**分析了激光晶体热效应的影响因素,利用热传导方程推导出激光晶体由于内部温度分布不均匀造成的端面热形变与晶体表面积的关系.针对普通圆棒晶体和螺纹棒晶体,分别计算了它们的热形变和热焦距,结果表明螺纹棒晶体可有效地改善激光晶体的热效应.

**关键词:**热透镜效应;螺纹型晶体;端面热形变;热焦距

中图分类号:TN244

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2010)05-0043-03

## Research on Thermal Lens Effect of Grooved Laser Crystal

ZHAO Zhen-yu, NIE Jin-song

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The influence factors of the thermal effect of laser crystal were analyzed. Using the heat conductive equation, the relationship between area of surface and thermal change of end face caused by the asymmetry distribution of inner temperature was deduced. The thermal distortion and thermal focus of common columniform crystal and grooved crystal were calculated, respectively. And the results indicate that the thermal effect of laser crystal can be effectually improved by using the grooved crystal.

**Key words:** thermal lens effect; grooved crystal; thermal distorting of end face; thermal focus

固体激光器以其优良的特性被广泛的应用于科研、军事、工业加工等领域<sup>[1]</sup>.但固体激光器在连续或脉冲工作方式下,输入泵浦灯的功率(能量)只有少部分(约为百分之几)转化为激光输出,其余部分转化为使泵浦灯、聚光器和激光晶体温度升高的热损耗.激光晶体中所产生的热,一方面使得激光晶体自身温度升高,引起荧光谱线加宽,量子效率降低,导致激光器阈值升高和斜效率降低;另一方面,激光晶体受热,引起晶体边缘的热膨胀,产生正热透镜效应.为有效减小激光器的热效应,可采用高效的冷却装置;或是采用不同形状的激光晶体<sup>[2]</sup>,例如文献中提到的板条型晶体以及薄片型晶体都是为了克服激光器的热效应<sup>[3]</sup>.螺纹棒晶体是指在普通棒状激光晶体的外表面加刻螺纹的晶体,目的也是为

减轻激光晶体的热效应.文中分析了该形状晶体对热透镜效应的影响.

## 1 晶体热透镜效应分析

### 1.1 晶体的端面效应

激光晶体的热透镜效应,也称为晶体的端面效应,是指由于晶体的内部温度分布不均匀,引起晶体端面形状发生形变,使得光线在其中传播出现偏折的现象.设闪光灯泵浦采用侧面对称结构,且为均匀泵浦,则固体激光棒所产生的端面效应,如图 1 所示.

其中, $l$ 为激光棒的长度, $l'$ 表示激光晶体由于受热效应的影响产生端面形变量.由于晶体棒内的

收稿日期:2010-07-19

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金

作者简介:赵振宇(1984-),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术的研究.

温度分布不均匀,棒端面的任一半径处沿轴向的变形量(相对晶体棒中心)为<sup>[5]</sup>:

$$l'(r) = \alpha L_0 [T(r_0) - T(0)] \quad (1)$$

式中,  $L_0$  为发生形变晶体区域长度,是指从晶体端面到晶体棒内的距离.对 Nd:YAG 晶体,则有  $L_0 \approx r_0$ <sup>[2]</sup>,  $T(r_0)$  为晶体表面的温度,  $T(0)$  为晶体中心的温度.

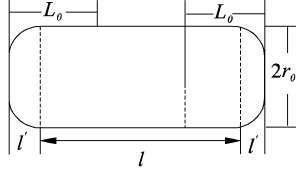


图1 晶体热透镜效应示意图

## 1.2 端面效应与晶体表面积的关系

假设棒状激光晶体被均匀泵浦(即内部受热均匀),晶体周围散热情况相同,忽略冷却介质沿棒轴方向的微小温度变化,则可视热流主要沿晶体棒的径向传导,可用一维热传导方程描述热稳定状况下的热流分布<sup>[2]</sup>.即

$$\frac{\partial T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{Q}{K} = 0 \quad (2)$$

式中,  $K$  为工作物质的热传导率;  $Q$  为激光晶体单位体积发热耗散的功率;  $r$  表示晶体棒横截面内任一半径.将晶体表面的温度设为边界条件,取晶体棒的中心为  $r=0$ ,激光晶体棒表面的温度为  $T_0(r_0)$  时,可求解积分方程得到晶体任一半径处的温度  $T(r)$  为

$$T(r) = T(r_0) + \frac{Q}{4K} (r_0^2 - r^2) \quad (3)$$

令  $r=0$ ,则棒中心的温度  $T(0)$  为

$$T(0) = T(r_0) + \frac{Q}{4K} \cdot r_0^2 \quad (4)$$

可得  $T(r_0) - T(0) = -\frac{Q}{4K} \cdot r_0^2$ .其中,  $Q$  表示单位体积产生的热,  $P_d$  表示晶体的热耗功率

$$Q = \frac{P_d}{\pi r_0^2 l} \quad (5)$$

晶体表面的温度  $T_0(r_0)$  与冷却介质温度、冷却情况以及输入电功率  $P_{in}$  有关,且  $P_d = \eta P_{in}$ ,  $\eta$  为热耗功率系数,激光晶体内产生的热量通过热交换传递给冷却介质.冷却介质与晶体表面之间存在一定的温差,在热平衡条件下,晶体内产生的热量应等于冷却介质从晶体表面吸收的热量.

$$P_d = sh [T(r_0) - T_F] \quad (6)$$

式(6)中,  $s$  为激光晶体与冷却介质接触的面积,  $s = 2\pi r_0 l$ .  $T_F$  为冷却介质的温度,  $h$  为冷却介质与晶体棒表面之间的热传递系数,单位是  $(W \cdot cm^{-2} \cdot ^\circ C^{-1})$ ,与冷却介质的性质、流量、有效流通面积等因素有关.

设晶体的热膨胀系数为  $\alpha$ ,则由式(1)、式(3)、式(4)有

$$l'(r) = -\alpha r_0 \frac{Q r^2}{4K} \quad (7)$$

式(7)中负号表示晶体棒外缘变化长度比中心段变化长度短.将式(2)~式(6)代入式(7)可以得到端面任一半径处由于热效应影响产生的形变量与晶体表面积的关系

$$l'(r) = -\alpha \frac{sh [T(r_0) - T_F]}{4\pi K r_0 l} r^2 \quad (8)$$

## 2 加刻螺纹对晶体热透镜效应的影响分析

为增大激光晶体的表面积,减小晶体的端面形变,在激光晶体表面加刻螺纹.如图2所示.

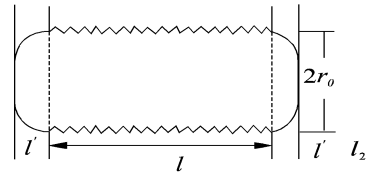


图2 加刻螺纹后晶体热效应示意图

晶体棒的半径为  $r_0$ ,长度为  $l$  不变,螺距为  $b$ ,螺纹深度为  $d$ .未刻螺纹时的激光晶体表面积为  $s = 2\pi r_0 l$ .

当晶体表面加刻螺纹后,每一个螺纹的沿侧棱展开后可看作是二个扇环的面积,假设扇环的面积为  $S'$ ,设激光晶体表面积变为  $F$ ,通过几何计算得

$$F = 2 \times \frac{l}{b} S' = \frac{2\pi r_0 l}{b} \sqrt{\left(\frac{r_0 b}{2d}\right)^2 + r_0^2} \left[1 - \frac{(r_0 - d)^2}{r_0^2}\right] \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)中得到采用螺纹型激光晶体端面任一半径处的形变量

$$l'(r) = -\alpha \frac{1}{b} \sqrt{\left(\frac{r_0 b}{2d}\right)^2 + r_0^2} \cdot \left[1 - \frac{(r_0 - d)^2}{r_0^2}\right] \cdot \frac{h [T(r_0) - T_F]}{2K} r^2 \quad (10)$$

由式(10)分析可得,激光晶体由于受热效应的影响,晶体棒中心变化量最大,在端面产生的正透镜

效应,端面由平面变为抛物面,负号表示由中心向两端端面效应逐渐减小.

### 3 数值计算与分析

设所采用的 Nd:YAG 晶体的参数如表 1 所列,螺距为  $b=0.5$  mm,螺纹深度为  $d=0.1$  mm.

表 1 Nd:YAG 晶体的基本参数

Structural parameter	$\Phi 8 \times 160$ mm
Thermoconductivity	$K=11$ W/m $\cdot$ °C
Thermal expansion coefficient	$\alpha=8 \times 10^{-6}$
Thermal-conductivity coefficient	$h=0.77 \sim 0.83$ W $\cdot$ cm $^{-2}$ $\cdot$ °C $^{-1}$

对热传导系数,为简化计算取为  $80\,000$  W $\cdot$ m $^{-2}$  $\cdot$ °C $^{-1}$ .同时,设  $P_{in}=12$  kW, $P_d=600$  W,冷却介质的温度恒定为  $27$  °C.利用 MATLAB 软件计算激光晶体的端面形变量与  $r/r_0$  的关系模拟计算,如图 3 所示.

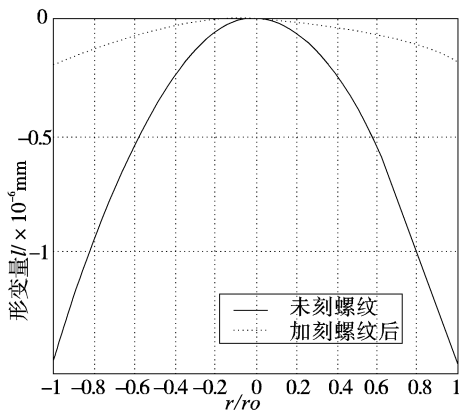


图 3 端面形变量与半径的关系

从图 3 中可以得出,晶体端面受热膨胀由平面变为抛物面,以晶体棒中心形变量为基准点,晶体表面相对中心的变化量最大.在激光晶体表面加刻螺纹后,端面中心处与边缘的形变量差异变小,有效减小了晶体的热效应.加刻螺纹后形变量降低到原来的 13.02%.

### 4 端面效应形成的热焦距

前文从解析角度分析了表面积的改变对晶体端面热形变的影响,得到晶体表面相对中心的变化量最大.但晶体棒半径  $r_0$  和形变量  $l'$  都很小,因此若

用热焦距描述端面效应,可以更直观的得出采用螺纹型晶体对热透镜效应的影响.且晶体棒端面由热变形形成的抛物面可近似为半径为  $R$  的球面,忽略微小变量  $l'^2(r_0)$ ,由几何关系可得

$$R = \frac{r_0^2}{2 \cdot |l'(r_0)|} \quad (11)$$

利用几何光学透镜焦距公式<sup>[6]</sup>

$$-\frac{1}{f_T} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2} \quad (12)$$

式(12)中, $r_1$ 、 $r_2$ 为激光晶体端面的曲率半径, $d$ 为晶体棒的长度, $n$ 为晶体的折射率.根据几何光学中符号原则,其中  $r_1 = -R$ , $r_2 = R$ ,由于  $l'$  很小, $d \approx l'$ .Nd:YAG 晶体的折射率  $n=1.832$ .

计算得出未刻螺纹的普通晶体棒的热焦距为  $f_T=3.266 \times 10^6$  mm,加刻螺纹后晶体的热焦距变为  $f_T'=2.596 \times 10^7$  mm.热焦距变大,激光晶体对激光束的汇聚能力下降,热透镜效应的影响减弱.

## 5 结 论

激光晶体的热效应是影响固体激光器输出较为突出的问题.采用螺纹棒可有效地增大激光晶体与冷却介质接触面积,减小晶体内部热梯度和热形变.计算结果表明,螺纹棒与相应的普通晶体棒相比热焦距得到显著提高,热透镜效应减弱.

### 参考文献

- [1] DU W X, MA J G, WANG N Y, et al. Essentials of laser for high technology[M]. China science and technology press, 2000: 26-27.
- [2] WANG J R, MING J C, SONG Y Z, et al. Cooling of a Side-Pumped Laser Slab by Heat Sink[J]. Acta Optica Sinic, 2005, 25(6): 830-83.
- [3] SHAO J, LI X L, FENG Y T. LD-End-Pumped Nd:YVO4 Slab Laser and Its Thermal Effect[J]. Acta Opticas Sinic, 2008; 38(3): 497-501.
- [4] LU B D. Solid-state laser [M]. Beijing: Beijing university of posts and telecommunications press, 2002: 92-99.
- [5] LI S M, HUANG W L. Fundamentals and design of laser device[M]. National defence industry press, 2005: 170-191.
- [6] HU Y X, AN L S. Apply optics[M]. China science and technology press, 2006: 58-63.