

文章编号: 1001-3806(2006)01-0073-03

## LD 端抽运下几种激光晶体的端面形变研究

杨永明<sup>1,2</sup>, 周 荣<sup>1</sup>, 过 振<sup>1\*</sup>, 王石语<sup>1</sup>, 蔡德芳<sup>1</sup>, 文建国<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071; 2. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

**摘要:** 为了对端抽运 DPSSL 的端面形变场进行测量, 研究了 LD 端抽运下 Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 晶体的端面形变。主要对具有轴对称性的不同抽运光的功率下所引起的端面形变进行了计算机模拟。先对温度场进行理论计算, 建立理论模型, 然后对形变进行理论计算, 并用计算机模拟了它们的形变。得到了由形变导致的热透镜焦距与致热功率之间的关系曲线, 另外得到 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 晶体的端面形变场分布。结果表明, 随着致热抽运功率的增大, 端面形变热透镜焦距越来越短, 均在 10m 以内变化, 而在聚焦半径为 0.45mm、光纤耦合 15W 时, 晶体形变量在 10 $\mu$ m 以内。

**关键词:** 二极管抽运固体激光器 (DPSSL); 热形变; 差分法; 端面形变

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Study on the end deformation of several LD end-pumped crystals

YANG Yongming<sup>1,2</sup>, ZHOU Rong<sup>1</sup>, GUO Zhen<sup>1</sup>, WANG Shiyu<sup>1</sup>, CAI Defang<sup>1</sup>, WEN Jianguo<sup>1</sup>

(1. School of Technical Physics, Xi'an University, Xi'an 710071, China; 2. School of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract** Study destination is to measure the end deformation of the end pumped DPSSL. End pumped by laser diodes with symmetric Gaussian beam, axial the end deformation of Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:KGW are discussed by computer simulation. First of all the heat model and theory model of the crystals are built up, then the temperature field is calculated. Under the defined condition, the deformation's distribution is plotted and the end deformation's focal lens is known. It can be shown that the end deformation's focal lens becomes shorter and shorter with the increase of the thermal pumped power and the lens is within 10m and each crystal's deformation is within 10 $\mu$ m when the pump waist is 0.45mm and pumped heat power is 15W.

**Key words** diode pumped solid state laser (DPSSL); thermal deformation; difference method; end deformation

### 引 言

晶体的热效应主要由 3 方面效应组成, 由温度梯度引起的折射率变化、由于热引力所引起的双折射热效应, 以及由于晶体抽运面所发生的形变所导致的端面形变热透镜效应。由温度梯度引起的热透镜效应起主要作用。热致应力双折射引起的热效应占总热效应的 20%, 而端面效应引起的热透镜效应最低, 低于 6%<sup>[1]</sup>。因当时激光器功率低, 人们对热透镜的研究主要就集中在对除端面形变以外的热透镜的研究上。

随着大功率固体激光器的不断问世, 在国外, XIONG 在未掺杂的 Nd:YVO<sub>4</sub> 发现了显著的端面形变热效应, 此时可将应力双折射热透镜效应忽略<sup>[2]</sup>。而国内华中科技大学激光教研室的 ZHU 等人采用对端面进行机械修磨的办法, 减少端面形变热透镜效应, 取

得了较好的效果<sup>[3]</sup>, 并且对侧面抽运的端面修磨进行了讨论<sup>[4]</sup>。可见, 研究晶体的端面形变的热效应问题, 已成为全固态激光器研究的一个热点。

对端面形变的理论探讨和数值计算也就显得尤为重要。作者以端面抽运 DPSSL 为研究对象, 建立其介质热透镜效应的理论模型, 分别讲述了温度梯度和端面效应产生的热透镜。用差分法数值解出 LD 端抽运下 Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 的端面形变分布。并进一步得出了其端面形变热透镜焦距与抽运光致热功率的关系曲线的方法。

研究其端面形变, 主要为半导体二极管通过光纤耦合, 在端抽运的情况下, 如何提高抽运耦合效率提供理论和技术指导。另外, 可以为谐振腔的设计提供理论指导, 有助于获得最好的 DPSSL 激光输出。

### 1 晶体物理热模型的建立

Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 晶体尺寸为  $\varnothing 3\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 端面镀有对 808nm 增透膜和 1064nm 全反膜, 通过循环水冷装置对晶体进行冷却。晶体形

作者简介: 杨永明 (1968-), 博士研究生, 主要从事二极管抽运的固体激光器的技术研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhgu@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2004-10-13 收到修改稿日期: 2004-12-23

状为圆柱形,为了降低温度,周围采用冷却措施,用铝圆柱壳固定包裹有铟膜的晶体。

对于晶体实际工作状态分析,在柱坐标系下,首先建立物理热模型。

(1)热模型中晶体的两个通光端面与空气相接触,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。

(2)抽运光强  $I(r)$  为高斯分布,在其横截面 ( $x-y$  面)上的光场分布具有轴对称性,其柱坐标系中的表达式为:

$$I(r) = I_0 \exp\left[-\frac{2r^2}{w_p^2}\right] \quad (1)$$

式中,  $w_p$  为抽运光的光斑半径。

(3)晶体吸收抽运光会产生热量,晶体介质对抽运光的吸收率为  $\beta$ ,在晶体距中心  $r$  处的热功率密度为:

$$q = I(r)\beta \quad (2)$$

(4)晶体侧面采用了冷却装置,侧面温度保持恒定,设定为  $T(r_0)$  作为热模型,数学处理可设其为 0(相对),得出温度场后,再叠加冷却环境温度  $T(r_0)$ 。

## 2 热形变的理论计算

端面效应不是由于整个介质的膨胀不均匀,而是端面附近局部区域发生长度变化造成的。端面形变主要由抽运光在晶体上产生端面热形变,具有空间轴对称性的高斯光束可看作光纤耦合的 DPSSL 的抽运光,因此对此情形进行热形变的计算。

其端面长度的变化量为:

$$\Delta l(r, z) = a_0 l_0 [T(r, z) - T(0, z)] \quad (3)$$

这个变化区域中心长度  $l_0$  近似等于介质的半径  $r_0$ :

$$\Delta l(r) = a_0 r_0 [T(r, z) - T(0, z)] = \int_0^{r_0} a_0 r_0 [T(r, z) - T(0, z)] dz \quad (4)$$

将端面抽运 DPSSL 的温差表达式 (3) 式转化为:

$$T(r, z) - T(0, z) = [T(r, z) - T(r_b, z)] + [T(r_b, z) - T(0, z)] = \Delta T(r, z) - \Delta T(0, z) =$$

$$\frac{\alpha P_{ph} \exp(-\alpha z)}{2\pi\kappa} \times \frac{-r^2}{w_p^2} \quad (5)$$

$$\Delta l(r) = \frac{a_0 r_0 P_{ph} [1 - \exp(-\alpha r_0)]}{2\pi\kappa} \times \frac{-r^2}{w_p^2} \quad (6)$$

式中,  $\kappa$  为热导率,  $a_0$  为热膨胀系数,  $P_{ph}$  为抽运光的致热功率,  $n_0$  为介质折射率,  $r_0$  是趋于 0 的中间变量,  $b$  是 0~1 之间的变量,  $\alpha$  为激光晶体对抽运光的吸收系数。

由上式可见,因端面效应介质端面由平面变为抛物面。当介质半径  $r_0$  较小时,抛物面可近似为球面。

该球面是以  $r=0$  处抛物面的曲率半径  $R$  为半径。根据几何关系,  $R$  的大小为:

$$R = \frac{\pi\kappa w_p^2}{a_0 r_0 P_{ph} [1 - \exp(-\alpha r_0)]} \quad (7)$$

若端面效应形成的端面形变的等效焦距为  $f_3$ , 按几何光学薄透镜公式确定:

$$f_3 = \frac{R/2(n_0 - 1)}{\frac{\pi\kappa w_p^2}{a_0 r_0 P_{ph} [1 - \exp(-\alpha r_0)] 2(n_0 - 1)}} \quad (8)$$

式中,  $r_0$  为介质半径。

激光的温度分布知道后可得到温差分布,再据温差分布得到形变分布。

以上在对温度理论分析的基础上,建立了高斯光束抽运下各向同性介质的端面形变模型,下面的工作主要对其进行计算机模拟,使研究更具体形象。

文献 [2] 和文献 [5] 中研究的均为各向异性 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,晶体均为长方体,文献 [2] 中采用的是有限元方法,文献 [5] 中采用的为 5 点差分法,作者研究的为圆柱形晶体,建立的是柱坐标系下的热传导模型,采用差分法时注重了其边界点的处理,应更接近于实际。且计算端面形变的方法和结果简捷,准确。

## 3 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 端面形变的模拟

### 3.1 设置求解网格

将方形  $R = \{(x, y) : 0 \leq x, y \leq a\}$  分割成  $(n-1) \times (m-1)$  个小方形,步长均为  $h$ :

$$\begin{cases} x = xi = ih \dots, (i = 0, 1, \dots, m) \\ y = yi = jh \dots, (j = 0, 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

每个方形为一个单元,边长为步长,网格交点为节点,任一节点的坐标表示为  $(x, y) = (ih, jh)$  简记为  $(i, j)$ , 见图 1 所示。

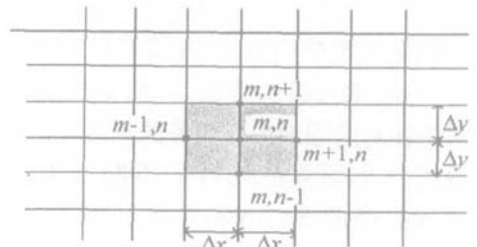


Fig 1 Crystal end's gridding

### 3.2 边界条件和初值条件

假设用恒温循环器控制冷却水的温度为 16°C, 故可假设晶体四周边界的温度均为 16°C, 即绝对温度为 289K, 以此作为初值条件。

### 3.3 模拟结果

3.3.1 Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 端面内热源发

热率的计算机模拟 对端面抽运光纤耦合 DPSSL 而言,假定抽运光打到晶体上时,光斑直径为 1mm。激光晶体放入铝块中,采用均匀水冷系统。利用数值方法中的差分法<sup>[5]</sup>解直角坐标系下的热传导方程:

$$\kappa_x \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \kappa_y \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (10)$$

$$f(x, y) = - 2P_{ph}\alpha(1 - e^{-\alpha d})^{-1} \times \exp[- 2(x^2 + y^2) / w_p^2] / \pi w_p^2 \quad (11)$$

令  $P_{in} \eta_i = P_{ph}$ ,  $P_{ph}$  为抽运光的致热功率,  $\alpha$  为激光晶体对抽运光吸收系数,  $\eta_i$  是由荧光量子效率和内跃迁损耗决定的热转换系数,  $P_{in}$  表示入射功率。当  $P_{ph} = 3W$  时,内热源发热率就可得出。Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 对 808nm 的吸收系数不同,其内热源发热率  $f(x, y)$  不同。以 Nd:YAG 为例说明,如图 2 所示。

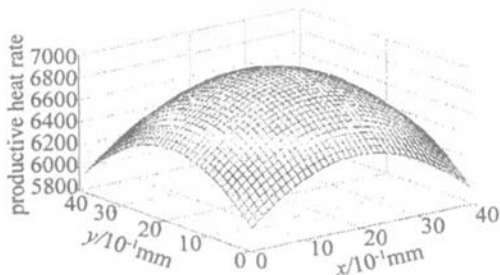


Fig 2 The heat distribution of the pyroboxin in Nd:YAG

3.3.2 Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 与 Nd:YAG 在 LD 端面抽运下端面形变及其端面形变热透镜焦距的模拟 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:KGW 在掺 Nd<sup>3+</sup> 后具有不同的吸收系数、热导率和热膨胀系数<sup>[6]</sup>,在具有轴对称性高斯光束抽运激光晶体、当抽运功率为 15W、抽运光的高斯半径  $w = 0.45mm$ 、晶体半径  $R = 1.5mm$ 、长度  $L = 10mm$  时,4 种晶体在抽运端面上的热形变图如图 3 所示。而图 4 则说明了 4 种晶体由端面形变引起的热透镜焦距与抽运光致热功率之间的变化曲线。

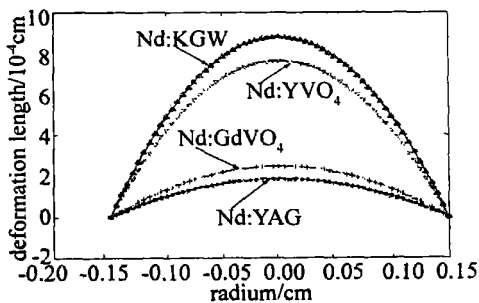


Fig 3 Four constant crystals' end deformation

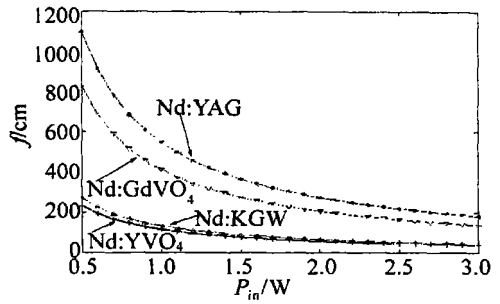


Fig 4 Four constant crystals' end deformation thermal lens vs thermal power

### 4 结束语

随着激光技术的发展和日益成熟,大功率固体激光器的不断问世,端面形变热透镜效应在激光二极管端面抽运时已经成为不可忽略的问题。以 LD 端面抽运 Nd:YAG 固体激光器为对象,通过理论模型建立和计算机模拟,得出了晶体热形变的理论模型,并进行了计算机模拟。根据理论分析和计算机模拟得出一些结论。

热透镜效应与抽运光功率成反比,与光斑半径的平方成正比;晶体半径只影响端面形变,而对介质的温度梯度和热应力双折射没有作用,晶体半径越大,端面形变热透镜的焦距越短;晶体棒越长,热透镜焦距越短,即热效应越强。由于介质热透镜并不是简单的几何透镜,所以,热透镜产生的相位差跟介质半径也不只是二次方关系,还包含了 3 次以上的高次项;在数值计算中,当半径取值越小,相位差的高次项就可以忽略,这时候,热透镜就越接近几何透镜。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [ M ]. 5th ed. Beijing Science Press, 2002. 357~ 364 ( in Chinese ).
- [ 2 ] XIONG Z, LIZH G, MOORE N *et al*. Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> lasers [ J ]. IEEE JQ E, 2003, 39( 8 ): 979~ 986.
- [ 3 ] ZHU G Zh, CHEN P F, ZOU X *Fetal*. Finite element analysis of laser medium's thermal lens [ J ]. Laser & Infrared, 2003, 33( 6 ): 437~ 439 ( in Chinese ).
- [ 4 ] ZHU G Zh, CHEN P F, ZOU X *Fetal*. Finite element analysis of laser medium's thermal lens [ J ]. Laser Technology, 2004, 28( 2 ): 208~ 210 ( in Chinese ).
- [ 5 ] GAO M Y, ZHENG Y. Numerical calculation of thermal effect on laser diode end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [ J ]. Laser Journal, 2003, 24( 2 ): 11~ 13 ( in Chinese ).
- [ 6 ] SHI P, LI L, GAN A Sh *et al*. Thermal effect research of Nd<sup>3+</sup> doped laser crystals in end-pumped all-solid-state laser [ J ]. Laser Technology, 2004, 28( 2 ): 177~ 180 ( in Chinese ).