

LD 端泵下 Nd : YAG 端面形变热效应研究*

杨永明^{1,2} 周 荣¹ 过 振¹ 王石语¹ 蔡德芳¹ 文建国¹

(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 用计算机模拟了在不同的泵浦光分布和不同的泵浦功率下其端面形变的大小. 主要对具有轴对称性的泵浦光和沿竖直方向为高斯分布, 水平方向为均匀分布的长条形泵浦光在不同的功率下所引起的端面形变进行了计算机模拟. 所采用的方法是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, 并用计算机模拟了形变. 得到了形变导致的端面形变热透镜焦距与致热功率之间的关系曲线, 目的在于进一步研究由于端面形变所引起的热效应.

关键词 二极管泵浦固体激光器; 热透镜; 端面形变

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

德国的 w. 克希奈尔在《固体激光工程》中, 首次对端面形变热透镜效应做了阐述, 并且认为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%^[1]. 由于当时, 激光器功率低, 后来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.

但是, 近几年来, 随着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侧面泵浦时, 还是较小, 大概在 6% 左右^[2], 在二极管端面泵浦时, 端面形变热效应在提高光斑功率密度的情况下, 应比侧泵时显著, 但人们在此方面的研究较少, 在国外, 2003 年 Z. Xiong 在未掺杂的 Nd : YVO₄ 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^[3]. 最近, 国内华中科技大学激光教研室的朱广志等人采用很好的冷却装置, 并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^[4].

以端面泵浦 DPL 为研究对象, 建立其介质热透镜效应的理论模型, 用叠代方法, 数值解 Nd : YAG 晶体中温度场分布, 给出了泵浦光为高斯光束数值解温度梯度热透镜的方法. 这个问题的解决, 主要为半导体二极管通过光纤藕合, 在端泵的情况下, 如何提高泵浦藕合效率提供理论和技术指导. 另外, 不但可以为谐振腔的设计提供理论指导, 有助于获得最好的 DPL 激光输出. 同时, 可以大大减少高重

频、窄脉宽及高峰值功率 DPL 研究中所耗费的人力和财力. 这正是本研究工作的意义和价值之所在.

1 模型建立

1.1 晶体物理热模型的建立

Nd : YAG 晶体尺寸为 $\phi 3 \times 10 \text{ mm}^3$, 端面镀有对 808 nm 增透膜和 1064 nm 全反膜, 通过循环水冷装置对晶体进行冷却. 晶体形状为圆柱形, 为了降低温度, 周围采用冷却措施, 用同轴铝圆柱壳固定包裹有钢膜的晶体, 并将其置入冷确套.

对于晶体实际工作状态分析, 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) 泵浦光强 $I(r)$ 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 (1), 长条型泵浦光强为 (2), w_p 为光斑半径

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/w_p^2) \quad (1)$$

$$I(y) = I_0 \exp(-2y^2/w_p^2) \quad (2)$$

3) 晶体吸收泵浦光会产生的热量, 晶体介质对泵浦光的吸收率为 β , 在晶体距中心 r 处的热功率密度为

$$q_v = I(r)\beta \quad (3)$$

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

在激光棒中, 主要热畸变的扰动出现在端面附近, 该处的自由表面改变了应力特征, 所谓的端面效

* 国防科技固体激光技术重点实验室基金项目 (NO: 51456050104DZ0101)

Tel: 029-88202574 Email: yang19368@sina.com

收稿日期: 2004-07-12

应,是指棒端面平面度的物理畸变,该畸变的诱因出现在距离晶体端面约一个直径内或者距离Nd:YAG端面约一个半径内的自平衡应力.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.端面形变是由泵浦光在晶体上产生端面热形变,本文主要研究的是具有空间轴对称性的高斯光束热形变以及在实际中大量用到的长条型均匀激光束的热形变研究.具有空间轴对称性的高斯光束可看作光纤耦合的DPL的泵浦光,因此这种热形变的计算的重要性就不言自明.

其端面长度的变化量为^[1]

$$\Delta l(r, z) = a_0 l_0 [T(r, z) - T(0, z)] \quad (4)$$

这个变化区域中心长度 l_0 近似等于介质的半径 r_0 .

$$\Delta l(r) = a_0 r_0 [T(r, z) - T(0, z)] = \int_0^l a_0 r_0 [T(r, z) - T(0, z)] dz \quad (5)$$

将端面泵浦 DPL 的温差表达式(4)转化为

$$T(r, z) - T(0, z) = (T(r, z) - T(r_b, z)) + (T(r_b, z) - T(0, z)) = \Delta T(r, z) - \Delta T(0, z) = \frac{\alpha P_{ph} \exp(-\alpha z)}{2\pi K_c} \frac{-r^2}{\omega_p^2} \quad (6)$$

代入式(5)中得

$$\Delta l(r) = \frac{a_0 r_0 P_{ph} (1 - \exp(-\alpha r_0))}{2\pi K} \times \frac{-r^2}{\omega_p^2} \quad (7)$$

式中 r_0 为介质棒长; a_0 为膨胀系数.

由式(7)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

$$R = \frac{\pi K \omega_p^2}{a_0 r_0 P_{ph} (1 - \exp(-\alpha r_0))} \quad (8)$$

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

$$f_3 = R/2(n_0 - 1) = \frac{\pi K \omega_p^2}{a_0 r_0 P_{ph} (1 - \exp(-\alpha r_0)) 2(n_0 - 1)} \quad (9)$$

式中, K 为热导率, a_0 为热膨胀系数, P_{ph} 为泵浦光的致热功率; n_0 为介质折射率, 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,建立了高斯光束泵浦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.

3 端泵 Nd:YAG 端面形变的模拟

3.1 计算热传导方程

利用数值方法中的差分法^[5]解下列热传导方程

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

$$f(x, y) = -2P_{ph} a (1 - e^{-\alpha z})^{-1} \cdot \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2}\right] / (\pi \omega_p^2) \quad (11)$$

3.2 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

$$\begin{aligned} x &= xi = ih (i=0, 1, 2, m) \\ y &= yi = jh (j=0, 1, 2, n) \end{aligned} \quad (12)$$

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) 如图 1.

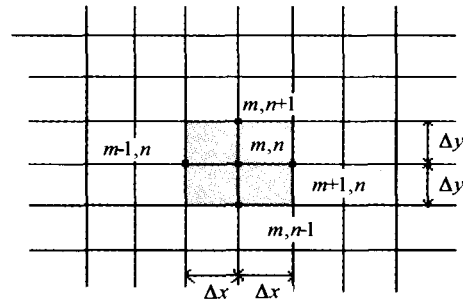


图 1 晶体端面的网络
Fig. 1 Crystal End's Gridding

3.3 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.

3.4 模拟结果

3.4.1 端泵 Nd:YAG 温度场分布的模拟结果

计算中所用参数值为: $\alpha = 7.1 \text{ cm}^{-1}$, $\omega_p = 1000 \mu\text{m}$, $K = 0.14 \text{ WP}(\text{cm} \cdot \text{k})$, $P_{ph} = 3 \text{ W}$ 时,晶体的尺寸为 $\phi 4 \times 10 \text{ mm}$.在轴对称高斯光束和长条行高斯光束泵浦下,绝对温度 T 在晶体横截面上的二维分布 $T(x, y)$ 如图 2.可见,晶体中心的温度高于边界温度几十度,如果冷却水不能及时地将热量带走就可能损坏晶体.

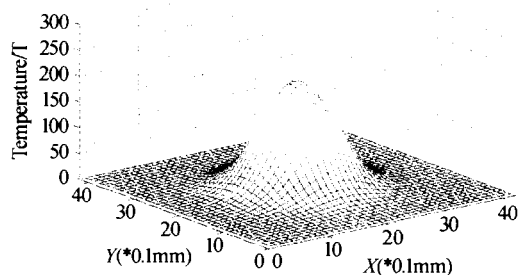


图 2 在轴对称高斯光束泵浦下晶体的温度场
Fig. 2 Temperature field of symmetric

在图 3 中,泵浦光为沿 y 方向的高斯分布,这种分布,对于任意 x 位置都是一样的,可见在热量集中的地方的温度比 x 方向边上的高出几十度.

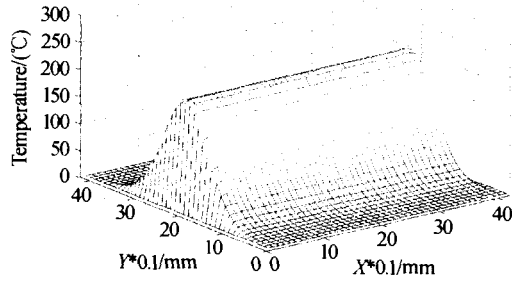


图 3 在长条形高斯光束泵浦下晶体的温度场
Fig. 3 Temperature field of strip Gauss profile

对于各向异性的激光晶体,由于其热传导系数的椭圆分布,使各截面热流量不一致,从而导致温度分布为非圆对称. 利用数值方法结合 MATLAB 程序语言,可以方便、直观地将其温度函数表示出来,有利于进一步对谐振腔的优化设计.

3.4.2 端泵 Nd:YAG 端面形变的计算机模拟

模拟出温度场分布后,据式(7)可模拟出上述条件下晶体的端面形变分布见图 4,图 5.

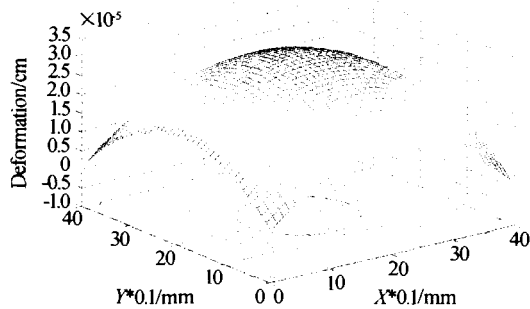


图 4 对称高斯光束泵浦下晶体的端面形变
Fig. 4 End deformation distribution of symmetric Gauss

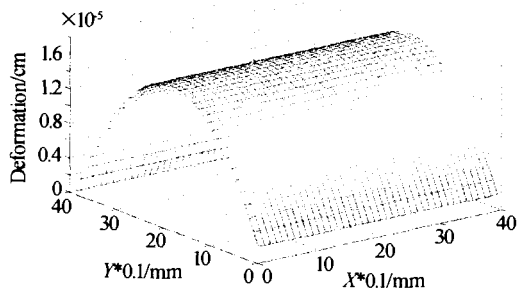


图 5 长条形高斯光束泵浦下晶体的端面形变
Fig. 5 End deformation distribution of strip Gauss

3.4.3 端面形变热透镜焦距的计算机模拟

模拟出端面形变分布后,据式(9)可模拟出上述

条件下晶体的端面形变热透镜焦距与泵浦功率的致热功率之间的关系曲线见图 6. 可见,致热功率增大,焦距变短,形变严重.

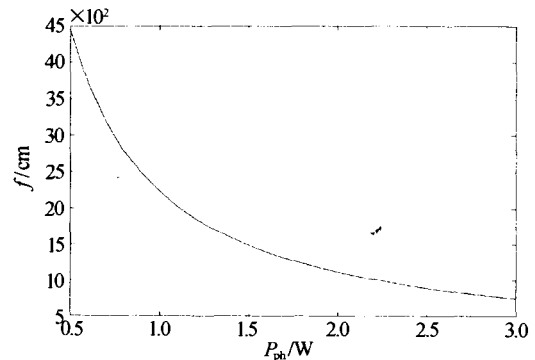


图 6 端面形变热透镜焦距与致热功率的关系
Fig. 6 Thermal lens of end deformation VS thermal power

4 结论

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泵浦时已经成为不可忽略的问题. 本文以 LD 端面泵浦 Nd:YAG 固体激光器为对象,通过对温度场的理论模型建立和计算模拟,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的结论将直接用于这一领域的新的研究.

参考文献

- 1 W·克希耐尔. 固体激光工程. 北京:科学出版社,第五版,2002. 357~364
Koechner W. Solid-State Laser Engineering. Beijing: Science Press, 2002. 357~364
- 2 张玲,杨少辰,李方博. LD 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的热效应研究. 激光与红外, 2003, 33(1): 37~39
Zhang L, Yang S C, Li F B. *Laser & Infrared*, 2003, 33(1): 37~39
- 3 Xiong Z, Zhigang G Li, Nicholas Moore, et al. Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped Nd:YVO₄ lasers. *IEEE J of Quan Elec*, 2003, 39(8): 979~986
- 4 朱广志,陈培锋,邹雪芬,等. 激光棒热透镜效应的有限元分析. 激光与红外, 2003, 33(6): 437~439
Zhu G Z, Cheng P F, Zou X F, et al. *Laser & Infrared*, 2003, 33(6): 437~439
- 5 高明义,郑义. 激光二极管端面泵浦 Nd:YVO₄ 激光器热效应的数值计算. 激光杂志, 2003, 24(2): 11~13
Gao M Y, Zheng Y. *Laser Journal*, 2003, 24(2): 11~13

End Deformation's Experiment and its Computer Mimic in LD end Pumped Nd:YAG Crystal

Yang Yongming^{1,2}, Zhou Rong¹, Guo Zhen¹, Wang Shiyu¹, Cai Defang¹, Wen Jianguo¹

1 School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

2 School of Science, Xi'an Univ. of Arch & Tech., Xi'an 710055

Received date: 2004-07-12

Abstract The end deformation, which is one of the thermal lens of the diode pumped Nd:YAG is discussed by computer simulation with two different pumped light profile. First of all, Nd:YAG's heat model and theory model are built up, then the temperature field is calculated. Under the define condition, the deformation's distribution is plotted and the focal lens of the end deformation are known. And the experiment aims at a further a study of the thermal effects caused by the end deformation.

Keywords Diode pumped solid-state lasers; Thermal focal lens; End deformation



Yang Yongming was born on Sep. 13, 1968 in Shaanxi Province. He received the B. S. degree in physics from Shaanxi Normal University in 1989 and the M. S. degree in physics from Shaanxi Normal University in 1994. Now he is working towards on the Ph. D. degree in optic engineering at School of Technical Physics, Xidian University. His research interest is the field of thermal effects in diode pumped solid-state lasers.