

# LD 端面抽运 Nd : KGW 激光器热效应的理论与实验研究\*

刘树山, 刘杰<sup>†</sup>, 刘敏, 李雷, 陈飞, 王伟卫

(山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

**摘要:**对 LD 端面泵浦 Nd : KGW 激光器的热效应进行了分析. 求解热传导方程得出了 Nd : KGW 晶体的温度分布和端面形变, 进而计算出了热焦距随泵浦功率的变化曲线, 并通过实验对其正确性进行了验证. 采用凹-平腔, 在不同透过率的输出镜下, 对 Nd : KGW 晶体的 1 064 nm 连续激光输出特性进行了研究.

**关键词:**固体激光器; Nd : KGW 晶体; 热效应; 热焦距

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)09-2170-4

## 0 引言

钨酸钪激光晶体即 KGd(WO<sub>4</sub>) (简称 KGW) 是一种新型的激光基质材料. 早在 1972 年俄罗斯的卡明斯基就报道过 Nd : KGW 激光晶体的一些物化性能和激光性能<sup>[1]</sup>, 但是直到九十年代, 随着半导体激光器(LD)的不断发展, 才引起人们的关注, 并开始成为研究的热点之一. Nd : KGW 激光晶体可掺杂浓度高(可达 10%), 在 808 nm 附近的吸收线的半高宽为 12 nm 比 Nd : YAG (1.5 nm)、Nd : YVO<sub>4</sub> (8 nm)的都大, 这正好处在 LD 发射的主波长范围内, 能容纳 LD 发射波长随温度的漂移, 更有利于二极管的抽运. 另外 Nd : KGW 激光晶体能产生自激励拉曼散射, 具有高效的斯托克斯和反斯托克斯转换, 经倍频成为可见光波段的多波长光源<sup>[2]</sup>. 可见 Nd : KGW 晶体具有一定应用价值. 目前有关 LD 端泵 Nd : KGW 激光器特性的报道很少, 大多数文献<sup>[3-5]</sup>只是对 Nd : KGW 激光晶体的生长、吸收光谱等特性进行了报道.

本文通过对激光二极管端面抽运矩形 Nd : KGW 晶体工作特点的分析, 建立了合理的物理模型, 利用 Matlab 进行编程求解. 得到了晶体内部温度分布和端面形变, 同时计算出了不同抽运功率下的热焦距, 并通过实验验证了它的准确度. 在以上工作的基础上优化谐振腔参量, 利用简单的直腔结构, 对 Nd : KGW 的基频 1 064 nm 激光特性进行了研究. 在抽运功率为 2.76 W 时获得了 944 mW 的基频输出, 光-光转化效率达到了 34.2%, 斜效率为 38.24%.

## 1 激光晶体热效应的理论分析

### 1.1 晶体热模型

如果将矩形 Nd : KGW 晶体放入一个紫铜做的槽内, 四周通过冷却水, 用一个恒温循环器控制水温. 当抽运光通过晶体中心时, 可以建立热模型如图 1.

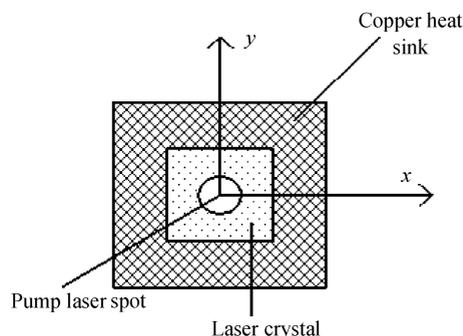


图 1 激光晶体热模型

Fig. 1 Schematic diagram of laser crystal thermal model

由于 Nd : KGW 晶体吸收部分抽运光能量而产生热, 则其内部遵循热传导泊松方程<sup>[6]</sup>

$$K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + q_v(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

$$q_v(x, y, z) = \frac{2Q\alpha}{\pi\omega_p^2} (l - e^{-\alpha l}) e^{-2(x^2+y^2)/\omega_p^2} e^{-\alpha z} \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为晶体吸收系数,  $K_x, K_y, K_z$  为晶体各个方向上的传导系数,  $Q = \eta P_{in}$  为晶体的总热耗,  $\eta$  为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数,  $\eta = 1 - \lambda_{in}/\lambda_{out}$ ,  $\lambda_{in} = 808 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{out} = 1 067 \text{ nm}$ ,  $P_{in}$  为输入功率,  $\omega_p$  为光斑半径,  $l$  为晶体长度.

激光晶体在紫铜块中并用恒温循环水冷却, 其侧面温度保持相对稳定, 设定冷却水的温度为 16 °C. 由于晶体的两个通光面和空气接触, 热交换量远小于通过晶体侧面热交换的量, 可以假设晶体两个端面绝热<sup>[7]</sup>, 可得方程的边界条件为

\* 山东省自然科学基金(Y2007G01)资助

<sup>†</sup> Tel: 0531-86182521

Email: jieliu@sdu.edu.cn

收稿日期: 2008-08-27

修回日期: 2008-12-15

$$T\left(\frac{a}{2}, y, z\right)=16; T\left(\frac{-a}{2}, y, z\right)=16 \quad (3)$$

$$T\left(x, \frac{b}{2}, z\right)=16; T\left(x, \frac{-b}{2}, z\right)=16 \quad (4)$$

$$\left.\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z}\right|_{z=0}=0; \left.\frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z}\right|_{z=l}=0 \quad (5)$$

抽运光通过具有热透镜效应的激光晶体时产生的光程差(OPD)为<sup>[6]</sup>

$$OPD(x, y, z)=\int_0^l \frac{\partial n}{\partial T} T(x, y, z) dz + (n_0 - 1) \Delta l + \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial n}{\partial \epsilon_{i,j}} \epsilon_{i,j}(x, y, z) dz \quad (6)$$

$$\Delta l = a_z \int_0^l T(x, y, z) - T(0) dz \quad (7)$$

式中  $n$  和  $n_0$  分别是激光晶体在温度  $T$  和初始温度 (16 °C) 时的折射率,  $\Delta l$  为端面形变,  $\epsilon_{i,j}$  是晶体的热应力张量,  $a_z$  是激光晶体  $z$  向热膨胀系数. 对于带腔镜的激光晶体式(6)中的  $(n_0 - 1)$  应变为  $n_0$ .

Innocenzi 等已经证明, 端面泵浦条件下柱形激光晶体内热聚焦作用在一级近似下可等效为一个薄透镜<sup>[8]</sup>, 并给出了热焦距和光程差的关系式

$$f = 2r^2 / OPD \quad (8)$$

### 1.2 计算结果

利用差分迭代法进行数学分析, 同时借助 Matlab 软件求解式(1)~(8). 计算中取抽运光斑半径  $\omega_p = 350 \mu\text{m}$ , 抽运功率  $P_m = 4 \text{ W}$ . 得到了晶体中心轴线温度分布、端面形变、热焦距的变化, 计算结果如图 2、图 3 和图 5 中的 A 曲线.

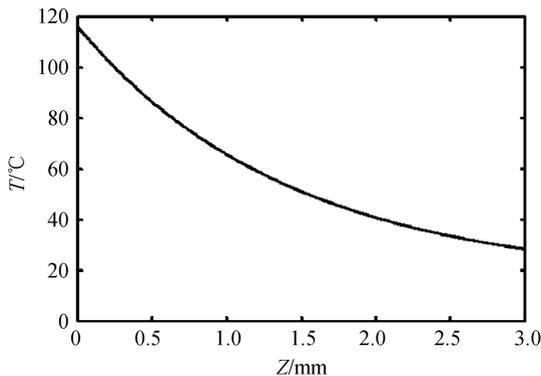


图 2 Nd:KGW 晶体中心轴温度分布  
Fig. 2 Thermal distribution of Nd:KGW central axis

由图 2 可以看出, 当泵浦抽运功率为 4 W 时, Nd:KGW 晶体中心最高温度竟达到了 116 °C, 其主要原因是 Nd:KGW 晶体的热传导系数 (3.8 W/mk) 很小约为 Nd:YAG 晶体的三分之一. 由于晶体中心高出边界 100 °C, 晶体中心和表面之间的温度梯度会产生较大的机械应力使晶体极易破裂. 在实验中, 当抽运功率增加到 3.5 W 左右时, 发现晶体被打坏, 这在其他文献中也有类似报道<sup>[9]</sup>. 因此以下对 Nd:KGW 晶体激光特性的实验研究都是在

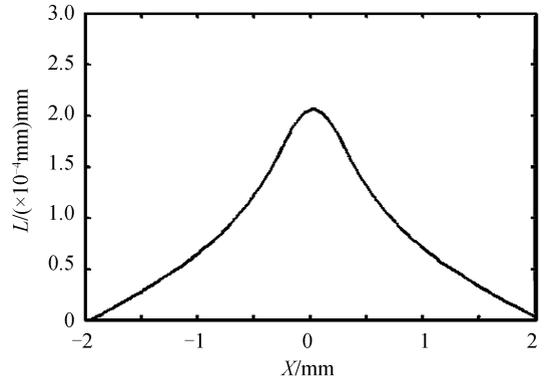


图 3 晶体抽运端面热形变  
Fig. 3 Thermal distortion of Nd:KGW pumped faces  
小功率的范围内进行的.

## 2 热焦距的实验测量

在固体激光器的设计中, 热焦距值的精确度对于优化谐振腔非常重要. 采取了一种简单易操作的测量方法<sup>[10]</sup>, 实验装置如图 4. 其中 Nd:KGW 晶

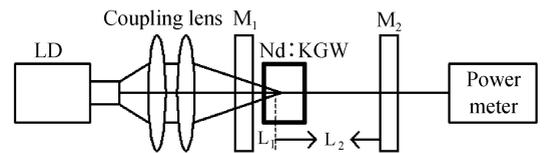


图 4 测量热焦距实验装置  
Fig. 4 Experiment setup of measuring thermal focal length  
体沿 b 轴切割, Nd 掺杂浓度 5at. %, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 3 mm. 谐振腔为平-平腔, M<sub>1</sub> 表面镀 HT@808 nm 和 HR@1 064 nm 介质膜, M<sub>2</sub> 表面镀有 T=3.5%@1 064 nm 介质膜. 根据谐振腔的稳定性条件

$$0 < g_1 g_2 < 1 \quad (9)$$

$$0 < (1 - L_1/f_T)(1 - L_2/f_T) < 1 \quad (10)$$

式中  $f_T$  为热焦距, 当  $L_1$  足够小时, 则  $1 - L_1/f_T$  约等于 1. 因此要使腔稳定, 要求  $L_2 < f_T$ . 当  $L_2 > f_T$  时, 谐振腔为非稳腔. 当  $L_2 = f_T$  时, 谐振腔近似为介稳腔. 实验中使  $M_1$  尽量与晶体靠近, 固定  $L_2$  值, 改变抽运功率, 当输出功率变为 0 时,  $L_2$  即为该功率下的热焦距. 测量结果如图 5(c).

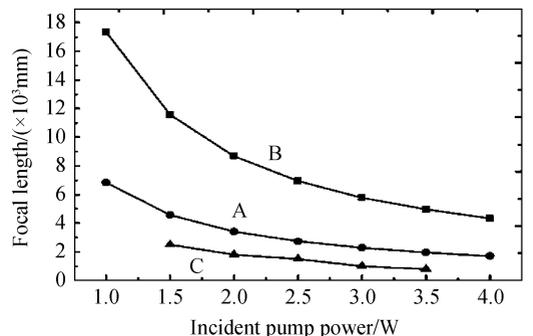


图 5 热焦距随抽运功率的变化  
Fig. 5 Dependence of the thermal focal length on the incident pump power

图 5 中, 曲线 A 是采用新方法计算出的热焦距值, 曲线 B 是使用的热焦距计算式(11)所得的值, C 是实验测量值. 通过对比可以看出, 采用新方法计算出的热焦距值比采用公式(11) 计算出的热焦距值与实验值吻合的更好一些, 当然还存在一定的偏差. 产生偏差的原因可以这样理解. 导致激光晶体产生热透镜效应的因素主要有三方面<sup>[11]</sup>: 晶体折射率随温度的变化、晶体的端面形变和热应力双折射. 计算热焦距时, 考虑因素越全面热焦距值会越准确, 当然计算难度也越大. 式(11) 只考虑了晶体折射率随温度的变化对热焦距的影响<sup>[12]</sup>. 新方法考虑了晶体折射率随温度的变化和晶体的端面形变两方面对热焦距的影响, 由于 Nd: KGW 晶体是自然双折射晶体, 计算中忽略了热应力双折射对热焦距产生的影响, 这样就会导致计算出的热焦距值偏大. 同时, 实验中所采用的测量方法假设了  $L_1 \approx 0$ , 这样就会导致测量出的热焦距值比实际值偏小. 所以计算值与实验值之间存在较大偏差. 更加精确的理论模型和计算公式有待进一步研究.

$$f = \frac{\pi k \omega_p^2}{\rho_{in} \eta \left( \frac{dn}{dt} \right)} \left[ \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (11)$$

### 3 LD 抽运 Nd: KGW 晶体 1 064 nm 激光特性

LD 端面泵浦 Nd: KGW 晶体 1 064 nm 连续波激光器装置如图 6. LD 最大可用输出功率为 7.5 W, 室温下峰值波长在 808 nm 附近, 光纤数值孔径为 0.12, 泵浦光经聚焦耦合系统后, 耦合到激光晶体中的光斑半径为 350  $\mu\text{m}$ . 谐振腔采用简单的凹-平腔设计.  $M_1$  为凹面镜镀 1 064 nm 高反膜和 808 nm 的高透膜作为输入镜, 曲率半径为 200 mm.  $M_2$  为输出平镜对 1 064 nm 的透过率分别为 3.5%、6%、10%.

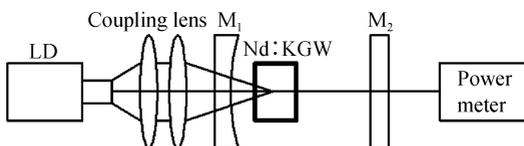


图 6 LD 抽运 Nd: KGW 连续 1 064 nm 输出装置  
Fig. 6 Experiment setup of diode-pumped Nd: KGW laser at 1 064 nm

实验中, 使用透过率不同的输出镜得到的输出功率和注入功率的关系如图 7. 可以看到, 当  $T=3.5\%$ 、 $6\%$  和  $10\%$  时, 输出功率随泵浦功率基本上是线性增加的. 实验结果如表 1.

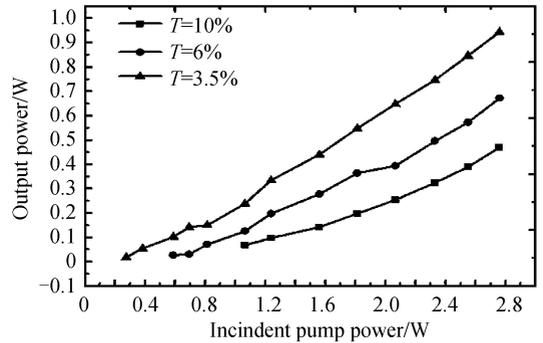


图 7 1 064 nm 连续波输出功率与注入功率的关系  
Fig. 7 1 064 nm CW output power versus incident pump power

表 1 激光实验结果

输出镜透过率	$T=3.5\%$	$T=6\%$	$T=10\%$
阈值泵浦功率/mW	292	589	1066
最大泵浦功率/W	2.76	2.76	2.76
最大输出功率/mW	944	672	470
光-光转换效率	34.2%	24.34%	17.28%
斜效率	38.24%	30.95%	27.74%

由此可见, 透过率高对应的阈值就大, 这与理论结果一致. 由于晶体的破坏阈值很低, 没有对更高的泵浦功率进行实验. 晶体尚未达到增益饱和, 增益一直大于损耗, 因此输出功率随泵浦功率变化一直线性增加.

### 4 结论

分析了 LD 端面抽运 Nd: KGW 激光晶体的实际情况, 利用一种新的方法求解泊松方程, 得到了晶体内部温度分布和端面形变, 同时计算出不同泵浦功率下的热焦距值, 发现通过这种方法计算出的热焦距值更接近实验测量值. 为全固态激光器谐振腔的优化提供了理论基础. 同时, 利用凹-平腔对 Nd: KGW 的 1 064 nm 连续激光进行了研究. 当输出镜透过率  $T=3.5\%$  时, 阈值泵浦功率为 292 mW, 泵浦功率为 2.76 W 时, 得到了 944 mW 的输出, 光-光转化率达到 34.2%. 可见 Nd: KGW 激光晶体具有阈值低、转换效率高的特点, 在低功率小型固体激光器的研发方面具有一定的应用前景.

#### 参考文献

- [1] KAMINSKII A A. Laser crystal[M]. Beijing: Science Press, 1981.  
A. A. 卡明斯基. 激光晶体[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [2] STANKOV K A, MAROWSKY G. High-efficiency multicolour Q-switched Nd: KGW( $\text{WO}_4$ )<sub>2</sub> laser[J]. *Appl Phys B*, 1995, **61** (2): 213-215.

- [3] ZANG Jing-cun, ZHAN Yong-ling. High-efficiency multiwavelength laser crystal Nd-doped potassium gadolinium tungstate with LD pumped[J]. *Optoelectronics · Laser*, 1997, **8**(2):10-13.  
臧竞存,詹永玲. LD 泵浦高效多波长激光晶体:掺钕钨酸钾钽[J]. *光电子·激光*, 1997, **8**(2):10-13.
- [4] TU Zhao-yang, LI Jian-fu, YOU Zhen-yu, *et al.* Modified CZ growth and the properties of Nd : KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2004, **19**(3):536-540.  
涂朝阳,李坚富,游振宇,等. 熔盐提拉法生长的 Nd : KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 单晶的性能研究[J]. *无机材料学报*, 2004, **19**(3):536-540.
- [5] GUO Li-hua, YANG Wen-qin, FENG Shang-yuan. Absorption spectrum analysis of Nd : KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and Nd : KG(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals[J]. *Appl Opt*, 2007, **28**(3):371-375.  
郭丽花,杨文琴,冯尚源. Nd : KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 和 Nd : KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体吸收光谱性能分析[J]. *应用光学*, 2007, **28**(3):371-375.
- [6] PFISTER C, WEBER R, WEBER H P, *et al.* Thermal beam distortions in end-pumped Nd : YAG, Nd : GSGG and Nd : YLF rods[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, **30**(7):1605-1615.
- [7] YANG Yong-ming, ZHOU Rong, GUO Zhen, *et al.* End deformation's experiment and its computer mimic in LD end pumped Nd : YAG crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1297-1300.  
杨永明,周荣,过振,等. LD 端面泵浦 Nd : YAG 端变形热效应研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9):1297-1300.
- [8] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, *et al.* Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1990, **56**(19):1831-1833.
- [9] YE Yi-cong, LIN Wen-xiong, WANG Guo-fu, *et al.* Study on LD-pumped Nd : KGW thin-disk laser[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(5):536-538.  
叶毅聪,林文雄,王国富,等. LD 抽运 Nd : KGW 薄片激光器的研究[J]. *激光技术*, 2006, **30**(5):536-538.
- [10] ZHANG Biao, HOU Xue-yuan, LI Yu-fei, *et al.* Thermal focal length and fundamental mode operation of a LD end-pumped Nd : GdYVO<sub>4</sub>[J]. *Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(9):920-923.  
张彪,侯学元,李宇飞,等. 端面泵浦 Nd : GdVO<sub>4</sub> 的热焦距及基频运转[J]. *光电子·激光* 2002, **13**(9):920-923.
- [11] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. 5rd ed. Beijing: Science Press, 2002: 357-364.  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2002:357-364.
- [12] YANG Yong-ming, WEN Jian-guo, GUO Zhen, *et al.* The thermal lens focus of the end-pumped Nd : YAG laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1769-1771.  
杨永明,文建国,过振,等. LD 端面泵浦 Nd : YAG 激光器中的热透镜焦距[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12):1769-1771.

## Thermal Effect of LD End-pumped Nd : KGW Laser

LIU Shu-shan, LIU Jie, LIU Min, LI Lei, CHEN Fei, WANG Wei-wei

(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

**Abstract:** The thermal effect of diode end-pumped Nd : KGW laser is studied. The temperature fields distribution in Nd : KGW crystal and end-face deformation were obtained by heat exchange equation. And the figures of the thermal focal length dependence on pump power were calculated which are validated by experimental results. The output characteristics of Nd : KGW 1 064 nm laser in concave-plane cavity were studied using output mirrors with different transmission.

**Key words:** Solid-state laser; Nd : KGW crystal; Thermal effect; Thermal focal length



**LIU Shu-shan** was born in 1981, and his research interest focuses on the diode pumped solid-state laser.