

Nd: NaY(WO₄)₂ 晶体的热焦距及最佳泵浦位置*

赵宏明, 赵圣之, 陈磊

(山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要:用光纤耦合的半导体激光器(LD)泵浦 Nd³⁺: NaY(WO₄)₂ (Nd:NYW)晶体,采用非稳腔法测量了晶体在泵浦功率 3.5~6.5 W 范围内的热焦距,并与理论计算结果进行了比较;同时,测量了不同泵浦功率下的最佳泵浦位置,理论分析计算与实验结果相符合,并对实验现象作出了合理的解释。

关键词: 半导体激光器; Nd:NYW; 热焦距; 最佳泵浦位置

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0018-03

Thermal focal length and optimal pumping position of Nd: NaY(WO₄)₂ crystal*

ZHAO Hong-ming, ZHAO Sheng-zhi, CHEN Lei

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: Thermal focal length of fiber-coupling LD end-pumped Nd:NYW laser were measured within the range of pump power from 3.5 to 6.5 W with a method of nonstable cavity, and the results were compared with the theoretical results. Meanwhile, the optimal pump position was investigated under different pump powers. The experimental results are consistent with theoretical prediction and the phenomena are interpreted reasonably.

Keyword: LD; Nd:NYW; Thermal focal length; Optimal pump position

0 引言

近年来, LD 泵浦的固体激光器以效率高、体积小、性能稳定等优点,引起了人们的极大关注^[1~4],而端面泵浦固体激光器能够将泵浦光聚焦在固体激光器的轴心,在空间上更好地与固体激光器的模式匹配,

所以被越来越多的激光器所采用。但是,随着泵浦功率的提高,激光晶体的热效应愈加明显,严重影响了输出激光的稳定性、模式耦合率、输出光束质量等。因此,从理论和实验上研究激光晶体的热焦距、泵浦光和谐振腔模相匹配、泵浦光在晶体中的最佳聚焦位置,对于大功率端面泵浦固体激光器件的设计有着重要意义。

收稿日期:2003-04-06; 修订日期:2003-05-27

* 基金项目:山东省科技发展计划基金资助项目(013060102);教育部博士点基金资助课题(1999042207)

作者简介:赵宏明(1979-),男,山东烟台人,硕士生,主要从事非线性光学和激光技术方面的研究工作。

掺钕新型晶体双钨酸钇钠 Nd³⁺: NaY(WO₄)₂ (Nd: NYW) 具有易生长、吸收带较宽的优点, 特别是其较大的非线性系数 $\chi^{(3)}$ 可以用来制作多波长喇曼激光器^[3,6]。Nd: NYW 晶体在 805 nm 附近具有 13.7 nm 宽的吸收带, 适合 LD 泵浦。人们对 Nd: NYW 晶体的激光特性进行了较为详细的研究^[7,8]。

1 Nd: NYW 晶体热焦距

实验装置如图 1 所示, 实验中使用的泵浦源是光纤耦合输出的半导体激光器 (FAP-I system, Coherent Inc. USA.), 被测 Nd: NYW 晶体 (山东大学晶体所) 沿 *a* 方向切割, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, 掺杂浓度为 0.5%, 晶体通光面镀 1.06 μm 高反膜和 808 nm 增透膜。M 为平面输出镜, 可在导轨上前后移动, 对 1.06 μm 光的透过率为 4%。根据稳定腔的条件:

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

$$0 < (1 - L_c / f_T)(1 - L_c / R) < 1 \quad (2)$$

式中 f_T 为晶体的热焦距; L_c 为腔长; R 为平镜的曲率半径 ($1/R=0$)。可以看出, 要使谐振腔为稳定腔必须 $L_c < f_T$ 。当移动平镜 M 使 $L_c > f_T$ 时, 谐振腔为非稳定腔, 输出光功率下降到零; 当 $L_c = f_T$ 时, 谐振腔可看作介稳腔。固定 LD 泵浦光的功率, 移动平镜 M 逐渐增大腔长, 当功率下降到零时, 此时的腔长 L_c 即为晶体在此泵浦功率下的热焦距^[9], 热焦距 ($1/f_T$) 随泵浦功率的变化如图 2 所示。从图 2 可以看出, 当泵浦功率增加时, 热焦距明显变短。

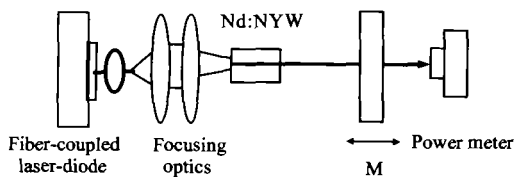


图 1 测量晶体热焦距实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring thermal focal length of crystals

如果忽略晶体热致双折射效应的影响, 同时考虑晶体的热致形变, 轴对称晶体的热透镜焦距理论计算表达式为^[10]:

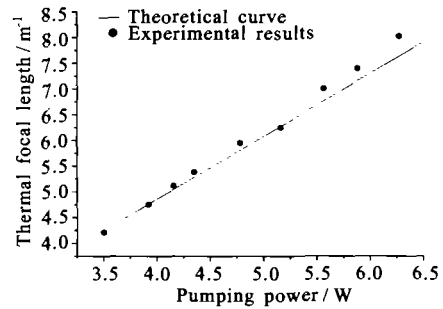


图 2 热透镜焦距随泵浦功率的变化曲线

Fig. 2 Thermal focal length as a function of pumping power

$$f_T = \frac{2\pi K_c}{\beta + n\alpha_T} \frac{\bar{\omega}_p^{-2}}{\xi P_m \eta} \quad (3)$$

式中 K_c 、 β 和 α_T 分别是晶体的热导率、热致折射率梯度和热膨胀系数; n 为晶体折射率; ξ 为热负荷比; $\eta = 1 - \exp(-\alpha l)$ 为晶体的吸收率 (α 为晶体的吸收系数); l 为晶体长度; $\bar{\omega}_p$ 为泵浦光在晶体中的有效平均泵浦半径。对 Nd: NYW 晶体, $K_c = 0.04 \text{ Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\beta = 7.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_T = 3.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $n = 1.9$, $\xi = 0.24$, $\bar{\omega}_p = 0.33 \text{ mm}$, $\alpha = 4.8 \text{ cm}^{-1}$, 由公式 (3) 可计算出热焦距 f_T 随泵浦功率 P_m 的变化曲线, 如图 2 中实线所示。

图 2 表明, 实验值与理论计算值基本相符, 但实验结果随着功率的升高而偏离理论值。考虑到采用的晶体参数在室温约为 300 K 取值, 实际上晶体内部工作温度远大于 300 K。当温度较高时, K_c 将变小, β 将变大, 热焦距随泵浦功率的变化将不再是线性关系, 而是呈一定幂指数变化^[11]。

2 LD 泵浦光最佳聚焦位置

测量 LD 端面泵浦 Nd: NYW 激光器泵浦光最佳聚焦位置的实验装置与图 1 基本相同, 只是 M 换为一曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$ 、透过率为 7% 的凹面镜。

测量中固定泵浦光的功率, 通过改变泵浦光的位置, 使输出光的功率随着改变, 以找到一个最佳的泵浦位置, 使输出光的功率最大, 此时泵浦光束腰在介质中距泵浦端面的距离, 即泵浦光在介质中的最佳泵浦位置。当泵浦功率 P_m 分别为 2.7 W、3.2 W 时, 测量出输出功率随泵浦位置的变化, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 对于不同的泵浦功率, 最佳泵浦位置距

泵浦端面约 1.5 mm。在固定最佳的泵浦位置后,测量出了不同泵浦功率下,基频光的输出功率随泵浦功率的变化,如图 4 所示。

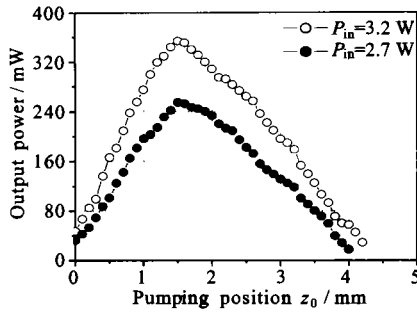


图 3 不同的泵浦功率下输出光功率随泵浦位置的变化关系曲线

Fig. 3 Output power as a function of pumping position z_0 for different incident pumping powers

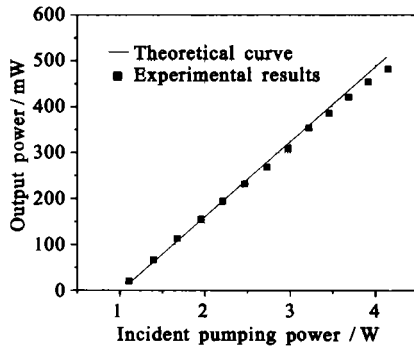


图 4 输出耦合镜透过率为 7% 时输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 4 Output power as a function of incident pumping power for output coupler $T=7\%$

如果假设泵浦光为基模运转的高斯光束,腔为单模运转,光束腰斑尺寸在激光腔内保持不变,泵浦光和激活介质特性参数的一般表达式为^[12]:

$$P_{th} = \frac{\delta I_s}{2\eta_p} \pi \left[\omega_{p0}^2 \frac{\eta}{\alpha l} + \frac{\lambda_p^2}{\alpha n^2 \pi^2 \omega_{p0}^2 l} f(z_0, \alpha, l) \right] \times (1 + \alpha) = P_{th}^* (1 + \alpha) \quad (4)$$

$$f(z_0, \alpha, l) = \left[(z_0 - l)^2 (\eta - 1) + \frac{2}{\alpha} (z_0 - 1) (1 - \eta) + \frac{2}{\alpha^2} (\eta - 1) + z_0^2 - \frac{2}{\alpha} z_0 + \frac{2}{\alpha^2} \right] \quad (5)$$

$$P_{out} = \frac{T}{2\delta l} \eta_p \eta_0 [P_{in} - P_{th}^* (1 + \alpha)] \quad (6)$$

式中 l 为晶体长度; η_p 为泵浦效率; $\omega_p(z)$ 为泵浦光束半径; ω_{p0} 为泵浦光束腰半径; λ_p 为泵浦光波长;

z_0 为泵浦光束腰在介质中距泵浦端面的距离,即泵浦光在介质中的泵浦位置; α 为激活介质的吸收系数; $\eta = 1 - \exp(-\alpha l)$ 为晶体的吸收率; $\eta_0 = \alpha(\alpha + 2) / (\alpha + 1)^2$ 为腔膜和泵浦光束之间的耦合系数^[13]。

在忽略其他因素影响的情况下,泵浦光在介质中的平均腰斑半径越小,其有效的泵浦半径中的有效泵浦体积就越小,单位体积的泵浦功率就越高,因而泵浦转换效率就越高^[14]。保持其他参量不变,可以得到有效泵浦体积取最小值时的最佳泵浦位置^[12]:

$$z_{0,opt} = \frac{1}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right) l \quad (7)$$

由公式(7)可以看出,最佳泵浦位置与激活介质的特性参数密切相关。图 5 给出了具有不同吸收系数的激活介质最佳泵浦位置随介质长度变化的理论关系曲线。若不考虑介质吸收的影响,即 $\alpha = 0$,最佳泵浦位置 $z_0 = l/2$,这正是参考文献[15]中所用到的几何判据。当 l 增大到一定程度时,最佳泵浦的位置与介质的长度无关,而是位于激活介质的吸收长度处。不同吸收系数 α 下,最佳泵浦位置随激活介质长度的变化如图 5 所示。

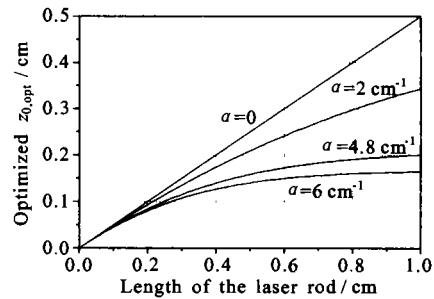


图 5 不同的吸收系数 α 下,最佳泵浦位置随激活介质长度的变化曲线

Fig. 5 Optimized pumping position $z_{0,opt}$ as a function of the length of the laser rod for different α

利用公式(6),从理论上模拟了在最佳泵浦位置基频光输出功率随泵浦功率的变化关系,如图 4 所示。计算所采用的参数为: $\sigma = 6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $I_s = 1.73 \times 10^5 \text{ mW/mm}^2$, $\delta = 0.05$, $\tau = 180 \times 10^{-6} \text{ s}$, $n = 1.9$, $T = 7\%$, $\eta_p = 0.55$, $\omega_{p0} = 220 \text{ }\mu\text{m}$, $\alpha = 4.8 \text{ cm}^{-1}$ 。

图 5 表明,实验结果与理论估算相符。

(下接第 46 页)

4 结束语

利用纯数字图像处理方法实现了电子图像稳定,文中算法充分利用了相邻块间运动矢量的空间相关性。实验表明,该算法具有计算量小、信噪比高的特点,避免了运动矢量的不一致,得到的图像稳定效果较好。

参考文献:

[1] 赵红颖,金宏,熊经武. 电子稳像技术概述[J]. 光学精密工程,

(上接第 20 页)

3 结论

利用 LD 端面泵浦 Nd:NYW 晶体,测量了 Nd:NYW 晶体的热焦距和最佳泵浦位置,实验结果与理论计算结果基本相符。

参考文献:

- [1] Berger J, Welch D F, Scifres D R, et al. 370 mW, 1.06 μm , CW TEM₀₀ output from an Nd:YAG laser rod end-pumped by a monolithic diode array[J]. Elec Lett, 1987, (23): 669-670.
- [2] Berger J, Welch D F, Streifer W, et al. Fiber-bundle coupled diode end-pumped Nd:YAG laser[J]. Opt Lett, 1988, 13(4): 306-308.
- [3] Kozlovsky W J, Fan T Y, Byer R L. Diode-pumped continuous-wave Nd:glass laser[J]. Opt Lett, 1986, 11(12): 788-790.
- [4] Berger J, Welch D F, Scifres D R, et al. High power, high efficient neodymium: aluminum garnet laser end-pumped by a laser diode array[J]. Appl Phys Lett, 1987, 51(16): 1221-1224.
- [5] Kaminskii A A, Kaminski, Hans J Eichler, et al. Properties of Nd³⁺-doped and undoped tetragonal PbWO₄, NaY(WO₄)₂, and undoped monoclinic ZnWO₄ and CdWO₄ as: laser-active and stimulated Raman scattering-active crystals [J]. Appl Opt, 1999, 38(21): 4533-4547.

2001, 9(4): 353-358.

- [2] 沈宏海,刘晶红,贾平,等. 摄像稳定技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 115-120.
- [3] Liu B, Zaccarin A. New fast algorithms for the estimation of block motion vectors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1993, 3(2): 148-157.
- [4] Li R, Zeng B, Liou M L. A new three-step search algorithm for block motion estimation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1994, 4(4): 438-441.
- [5] Lai-Man Po, Wing-Chung Ma. A novel four-step algorithm for fast block motion estimation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 313-317.
- [6] 陈磊,赵圣之,郑加安. 双钨酸钇钠晶体 Cr⁴⁺:YAG 调 Q 激光特性[J]. 光电子·激光, 2002, 13(1): 27-30.
- [7] 陈磊,赵圣之,郑加安. 595 nm 激光抽运双钨酸钇钠晶体激光特性研究[J]. 光学学报, 2002, 22(6): 758-760.
- [8] Chen L, Zhao S, Zheng J. Characteristics of a passively Q-switched Nd³⁺: NaY(WO₄)₂ laser with Cr⁴⁺: YAG saturable absorber[J]. Opt & Laser Technol, 2002, 34(5): 347-350.
- [9] Liu Jun hai, Lu Jian ren, Lu Tun hua, et al. Thermal lens determination of end-pumped solid-state laser by a simple direct approach[J]. Chin Phys Lett, 1999, 16(3): 181-183.
- [10] 郑加安,赵圣之,陈磊. 晶体热效应对端面泵浦固体激光器优化设计的影响[J]. 光子学报, 2001, 30(6): 724-729.
- [11] Silvestri S D, Laporta P, Magni V. Pump power stability range of single solid state lasers with rod thermal lensing[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1987, 23(11): 1999-2003.
- [12] 郑加安,赵圣之,陈磊. LD 纵向泵浦固体激光器腔参数优化[J]. 光电子·激光, 2000, 11(5): 436-440.
- [13] Chen Y F, Huang T M, Kao C F, et al. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: Influence of thermal effect[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1997, 33(8): 1424-1429.
- [14] Hall D G, Smith R J, Rice R. Pump-size effects in Nd:YAG lasers[J]. Appl Opt, 1980, 19(18): 3041-3043.
- [15] Fan T Y, Sanchez A. Pumping source requirements for end-pumped lasers[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1990, 26(2): 311-316.