

文章编号: 1001-3806(2014)03-0360-04

LD 端面抽运 Nd:GKG 激光器热效应研究

冯 祝¹, 万云芳²

(1. 山东理工大学 生命科学学院, 淄博 255049; 2. 山东理工大学 理学院, 淄博 255049)

摘要: 为了研究激光二极管端面抽运掺钕钷石榴石 Nd:GKG 激光器的热效应, 采用实验测量与理论计算相结合的方法, 进行了激光器的连续运转, 测量了激光器的热焦距、本征损耗和热损耗。结果表明, 采用凹-平腔结构, 当抽运功率为 28.8W 时, 得到最大连续波输出功率为 13.2W, 对应最大斜效率为 51.5%, 光光转换效率为 49.5%, Nd:GKG 晶体的本征损耗测量值为 0.86%/cm; 测量结果与理论计算吻合得很好。所得结果为 LD 抽运 Nd:GKG 激光器的进一步设计优化提供了实验和理论依据。

关键词: 激光器; Nd:GKG; 热效应; LD 端面抽运

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.03.016

Thermal effect of LD end-pumped Nd:GKG laser

FENG Zhu¹, WAN Yunfang²

(1. School of Life Sciences, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. School of Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to study the thermal effect of LD end-pumped Nd:GKG laser, the thermal focal length, intrinsic loss and thermal loss were measured with the laser operating continuously. The results show the maximal output power of 13.2W, the maximal slope efficiency of 51.5% and the optical conversion efficiency of 49.5% were obtained in a plano-concave cavity when the pump power was 28.8W. The intrinsic loss of Nd:GKG crystal was 0.86%/cm. The result was in good agreement with the theoretically calculation. The results can offer experimental and theoretical basis for the further optimization of LD pumped Nd:GKG laser.

Key words: lasers; Nd:GKG; thermal effect; LD end-pumped

引 言

钕钷石榴石 ($Gd_3Ga_5O_{12}$, GGG) 在 1964 年由 GEUSIC 等人首次生长成功^[1], 表现出热传导性能优异、激光抽运阈值低、机械性能优良和热容大等优点, 是适合 Nd^{3+} 掺杂的激光晶体。与其它掺 Nd^{3+} 晶体, 如 Nd:YVO₄, Nd:GdVO₄, Nd:YGdVO₄ 和 Nd:YAG 等相比, Nd:GKG 晶体不存在称为“核”^[2,3] 的光学不均匀区域, 从而能够生长成为大体积晶体, 而且能支持高达 0.04 甚至更高的 Nd^{3+} 掺杂原子数分数^[4,5]。因此, Nd^{3+} :GGG 被认为是固体热容激光器 (solid-state heat-capacity laser, SSHCL) 的最佳工

作晶体^[6], 在固体热容激光器中获得广泛应用^[2,7]。此外, Nd:GKG 晶体的宽吸收带降低了对激光二极管抽运源的波长敏感性^[4], 近年来, 激光二极管抽运的高功率 Nd:GKG 激光器吸引了人们的兴趣^[5,8,9]。QIN 等人报道了最大连续波输出功率 7.2W 的二极管抽运 Nd:GKG 激光器^[5]。激光晶体的热效应对激光运转特性有重要影响, 值得研究^[10]。但关于高功率激光二极管端面抽运 Nd:GKG 激光器热效应方面的研究还比较少^[11-12]。

本文中报道了激光二极管端面抽运高功率 Nd:GKG 激光器并研究了其热效应。抽运功率 28.8W 时, 得到最大连续波输出功率 13.2W, 对应最大斜效率为 51.5%, 光光转换效率为 49.5%。利用测得的抽运功率阈值, 计算得到 Nd:GKG 晶体的本征损耗为 0.86%/cm。采用平平腔结构, 测量了热焦距及其随抽运功率的变化关系。从理论上计算了热焦距及热致损耗, 结果与实验符合得较好。

作者简介: 冯 祝 (1957-), 男, 副教授, 现主要从事全固态激光器技术等方面的研究。

E-mail: fengzhu_sdut@163.com

收稿日期: 2013-09-13; 收到修改稿日期: 2013-09-24

1 实验设置

实验设置如图 1 所示。腔镜 M_1 曲率半径 200mm, 腔外一侧镀 808nm 增透膜, 另一侧镀 1061nm 高反膜和 808nm 高透膜。 M_2 是平面输出镜, 实验中采用 1061nm 透过率为 1.7% ,5% ,10% ,15% ,20% 和 27% 的 6 种镀膜方式。 Nd:GGG 晶体掺 Nd^{3+} 原子数分数为 0.01, 晶体尺寸 4mm × 4mm × 6mm (6mm 为透光方向长度), 其两个端面均镀有 1061nm 和 808nm 增透膜。 晶体用铝箔包裹后放置于铝块中通循环水冷却, 水温设置为 18°C。 抽运源采用光纤耦合激光二极管, 最大输出功率为 30W。 抽运光经聚焦耦合系统会聚到 Nd:GGG 晶体上, 会聚光斑大小约为 200 μ m, 数值孔径为 0.22。

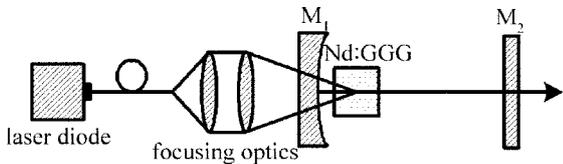


Fig. 1 The configuration of Nd:GGG laser in continuous operation

2 结果与讨论

激光谐振腔腔长设置为 12.5mm, 研究其连续运转特性。 当输出镜透过率分别为 1.7% ,5% ,10% ,15% ,20% 和 27% 时, Nd:GGG 激光器的 1061nm 连续波输出功率如图 2 所示。 这 6 种透过率腔镜对应的抽运功率阈值分别为 0.07W, 0.16W, 0.36W, 0.64W, 0.90W 和 1.29W。 当输出镜透过率为 5% 时, 获得最大输出功率 13.20W。 最大斜效率和光光转换效率分别为 51.5% 和 49.50%。 图 3 中给出了抽运功率阈值与输出镜反射率 R_2 的对数之间的关系。 由图可见, 两者满足较好的线性关系。

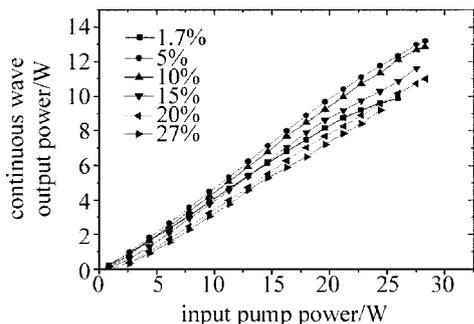


Fig. 2 Output power vs. input pump power

激光晶体的本征损耗用 Findlay-Clay (F-C) 方

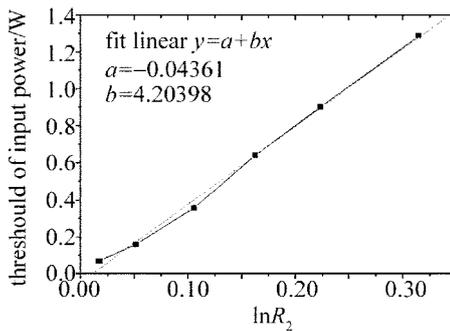


Fig. 3 Threshold input power vs. $\ln R_2$

法测量。 当激光器工作在阈值附近时, 激光晶体的本征损耗满足方程^[13]:

$$P_{th} = k \left[\delta_0 - \frac{1}{2L} \ln(R_1 R_2) \right] \quad (1)$$

式中, k 为损耗系数; δ_0 为本征损耗, 主要来自于吸收和激光材料的非均匀性带来的衍射损失; R_1 , R_2 分别表示输入、输出腔镜的反射率; L 表示激光晶体长度。 代入实验参量求解方程, 计算得到本征损耗为 $\delta_0 = 0.86\%$ /cm。

如果谐振腔结构一定, 则激光模式质量和运转稳定性由抽运导致的热透镜效应决定。 实验中测量了热焦距及其随抽运功率的变化, 测量时将凹-平腔换为平-平腔, 抽运结构和激光晶体的位置没有变化。 根据圆转换方法^[12], 当波前与端镜 M_1 和 M_2 的曲率半径相符时, 谐振腔会支持稳态运转。 根据 ABCD 传输矩阵和谐振腔稳定性条件, 满足当 $1 - L_1/f_1 > 0$ 时, 谐振腔是稳定的, 其中 L_1 是激光晶体中心距离输出镜 M_2 的距离, f_1 表示激光晶体的热焦距。

实验中移动腔镜 M_2 不但改变谐振腔腔长, 而且容易破坏谐振腔的准直性, 从而改变激光输出功率。 为克服这一缺点, 固定 M_2 的位置, 改变抽运功率, 当 $f_1 < L_1$ 时, 谐振腔进入非稳区, 激光输出停止。 热焦距 f_1 与抽运功率 P_{in} 的关系如图 4 所示。 图 4 中方形图标代表实验测量数据, 而圆形图标则是根据以下公式^[14-15] 计算得到的结果:

$$f_1 = \frac{2\pi\kappa}{(\beta + n\alpha_1)} \cdot \frac{w_p^2}{\xi P_{in} [1 - \exp(-\alpha l)]} \quad (2)$$

式中, κ 表示热导率, $\beta = dn/dT$ (T 代表温度) 表示折射率的温度变化系数, n 表示晶体折射率, α_1 是热膨胀系数, α 是晶体对抽运光的吸收系数, l 表示激光晶体长度, w_p 表示抽运光半径, ξ 表示抽运光转化为热量的比率。 对于实验中采用的掺杂原子数分数为 0.01 的 Nd:GGG 晶体, $\kappa = 6.43$ W/(m · K), $\beta =$

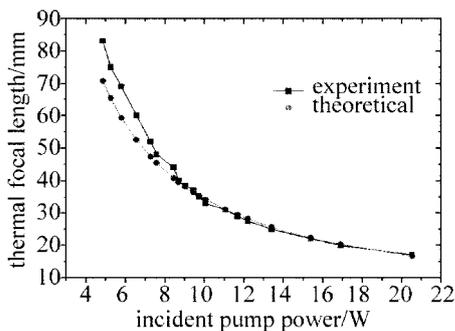


Fig. 4 Thermal focal length vs. incident pump power

$17 \times 10^{-6}/K, n = 1.95, \alpha_t = 8 \times 10^{-6}/K, \alpha = 300/m, l = 6mm, w_p = 0.275mm, \xi = 0.3$. 从图4可见, 实验结果与理论计算结果符合得很好。需要指出的是, 由于激光晶体本身长度以及实验条件限制, 抽运功率21W以上时对应的热焦距没有测得。

对热效应导致的损耗 δ_t 的较严格的理论计算, 需要采用 FOX 和 LI^[16] 提出的光波传输方法进行详细计算, 但这种方法非常复杂。可以利用关系式 $\delta_t = 1 - R$ ^[17] 进行简单合理的理论估算, 其中 R 表示用 Strehl 强度比^[18] 描述的参考球面中央的强度比, 考虑高斯电场振幅比重因子 $\exp(-\frac{r^2}{w_0^2})$, R 可由下式表示^[19]:

$$R = \frac{\left| \int_0^{r_{eff}} \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\varphi) \exp(-\frac{r^2}{w_0^2}) r dr \right|^2}{\left| \int_0^{r_{eff}} \exp(-\frac{r^2}{w_0^2}) r dr \right|^2} \quad (3)$$

式中, λ 表示光波波长, r 为极坐标半径, w_0 表示激光腔模的光腰, r_{eff} 表示晶体材料的有效半径, $\Delta\varphi$ 表示波前相对于参考球面的距离, 计算公式由下式表示:

$$\Delta\varphi = \frac{P_{in} \eta (dn/dt + \alpha_t n)}{2\kappa\lambda} \times \begin{cases} 1 + \ln(r_{eff}^2/w_p^2), (r \leq w_p) \\ r^2/w_p^2 + \ln(r_{eff}^2/r^2), (r > w_p) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\eta = 1 - \exp(-\alpha l)$, 而 w_0 可由 ABCD 传输矩阵法求得, 因此可以得到热致损耗 $\delta_t = 1 - R$ 与抽运功率之间的关系。利用(3)式和(4)式, 可以从理论上计算光纤耦合激光二极管端面抽运 Nd:GGG 晶体的热致损耗 $\delta_t = 1 - R$ 。

利用不同输出镜透过率下输入输出功率结果, 可以根据下面公式^[20] 得到热致损耗 δ_t 的实验测量值:

$$\delta_t = \frac{T_1 \eta(T_2) \ln R_2 - T_2 \eta(T_1) \ln R_1}{T_1 \eta(T_2) - T_2 \eta(T_1)} - \delta_0 \quad (5)$$

式中, T_1, T_2 是两个输出镜的透过率, R_1, R_2 是对应两个输出镜的反射率, $\eta(T_1), \eta(T_2)$ 是对应于 T_1 和 T_2 的斜效率。

不同抽运功率下热致衍射损耗如图5所示。实心和空心图标分别表示实验数据和理论计算结果。可见两者在一定程度上吻合, 变化趋势一致, 即抽运功率越高, 热致损耗越大。当抽运功率超过12W时, 两者虽有共同的增大趋势, 但数值差别较大, 没有在图5中给出。主要原因应该是理论估计方法本身不够严格。

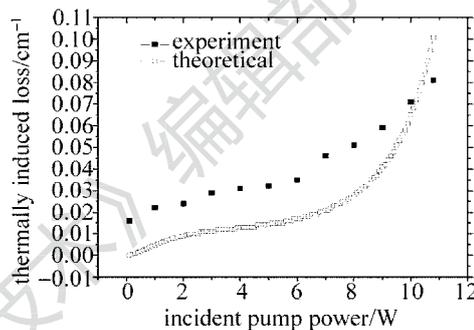


Fig. 5 Thermal induced loss vs. incident pump power

3 结论

实验上获得了高效率的激光二极管端面抽运连续运转 Nd:GGG 激光器。利用透过率5%的输出镜, 在抽运功率为28.8W时, 获得最高输出功率13.20W。最大斜效率和光光转换效率分别为51.5%和49.5%。利用 F-C 方法测得的激光晶体本征损耗为0.86%/cm。不同功率下的热焦距结果与理论计算符合得较好。热致损耗测量结果与理论估计在低抽运功率下比较吻合。本文中的研究内容对 LD 端面抽运全固态激光器的设计和优化有重要指导意义。

参考文献

- [1] GEUSIC J, MARCOS H, van UITERT L. Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets[J]. Applied Physics Letters, 1964, 4(10):182-184.
- [2] YOSHIDA K, YOSHIDA H, KATO Y. Characterization of high average power Nd:GGG slab lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6):1188-1192.
- [3] HAYAKAWA H, MAEDA K, ISHIKAWA T, et al. High average power Nd:Gd₃Ga₅O₁₂ slab laser[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1987, 26(10):L1623-L1625.
- [4] LABRANCHE B, QUN W, GALARNEAU P. Diode-pumped-CW and quasi-CW Nd:GGG (Ca, Mg, Zr) laser[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2041:326-331.
- [5] QIN L, TANG D, XIE G, et al. High-power continuous wave and

- passively Q -switched laser operations of a Nd:GGG crystal[J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(2):100.
- [6] DONG Y, ZU J, HOU L, *et al.* Approximate formulas of temperature and stress distributions and thermal induced effects in a heat capacity slab laser[J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(6):326-328.
- [7] MAHAJAN R, SHAH A, PAL S, *et al.* Analytical study for investigating the behaviour of Nd-doped glass, YAG and GGG under the heat capacity mode of operation[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(7):1406-1412.
- [8] ZHARIKOV E V, IL'ICHEV N N, LAPTEV V, *et al.* Sensitization of neodymium ion luminescence by chromium ions in a $Gd_3Ga_5O_{12}$ crystal[J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1982, 12(3):338-341.
- [9] GERHARDT R, KLEINE-BORGER J, BEILSCHMIDT L, *et al.* Efficient channel-waveguide laser in Nd:GGG at $1.062\mu\text{m}$ wavelength[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(9):1210-1212.
- [10] ZHANG Y K, ZAN H P. Effect of pumping light distribution on thermal distortion of laser crystal with circular cross-section [J]. Laser Technology, 2013, 37(5):647-650 (in Chinese).
- [11] SHI P, XIN Y, LI L, *et al.* Thermal analysis of rectangular Nd:GGG heat capacity lasers[J]. Laser Technology, 2011, 35(3):305-307 (in Chinese).
- [12] XIN Y, SHI P, LI L, *et al.* Analysis of thermal effect of LD double side pumped Nd:GGG heat capacity laser crystal[J]. Laser Technology, 2011, 35(6):787-791 (in Chinese).
- [13] FINDLAY D, CLAY R. The measurement of internal losses in 4-level lasers[J]. Physics Letters, 1966, 20(3):277-278.
- [14] SONG F, ZHANG C, DING X, *et al.* Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ lasers[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(12):2145-2147.
- [15] SAFARI E, KACHANOV A. Estimation of thermal lensing effect in the high-power end-pumped direct-cut crystal lasers[J]. Optics & Laser Technology, 2006, 38(7):534-539.
- [16] FOX A, LI T. Modes in a maser interferometer with curved and tilted mirrors[J]. Proceedings of the IEEE, 1963, 51(1):80-89.
- [17] SCHULZ P A, HENION S R. Liquid-nitrogen-cooled Ti:Al₂O₃ laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(4):1039-1047.
- [18] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. Oxford, USA: Pergamon Press, 1975:460-464.
- [19] CHEN Y, HUANG T, KAO C, *et al.* Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(8):1424-1429.
- [20] LIU J H, LU J H, LU J R, *et al.* Investigation of thermally induced losses in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO₄ solid-state lasers [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2000, 17(1):48-53 (in Chinese).