

885 nm 和 808 nm LD 抽运 Nd:CNGG 935 nm 激光器热效应研究

施玉显¹ 卢铁林¹ 冯宝华² 张怀金³ 于浩海³ 王继扬³

¹北京交通大学理学院, 北京 100044
²中国科学院物理所光物理研究重点实验室, 北京 100190
³山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

摘要 从实验和理论两方面分析了 808 nm 和 885 nm 激光二极管(LD)端面抽运 Nd:CNGG 935 nm 激光器的热透镜效应。当吸收功率为 10 W 时,在 885 nm LD 端面抽运情况下,Nd:CNGG 激光器的热透镜焦距约为 808 nm LD 端面抽运方式下的 6.8 倍。同时,利用 885 nm LD 端面抽运方式,晶体内部的温度梯度更小。利用 808 nm 和 885 nm LD 端面抽运方式,在抽运光束腰位置,Nd:CNGG 晶体内部最高温度分别为 287.76 K 和 310.05 K。在抽运端面位置,晶体最高温度分别为 285.78 K 和 317.18 K。相对于同等实验条件下的 808 nm 抽运方式,885 nm 抽运下的 Nd:CNGG 935 nm 激光器斜率效率提高了 43%(从 4.6% 提高到 6.6%),阈值降低了 8%(从 3.31 W 下降到 3.05 W)。

关键词 激光器;885 nm 直接抽运;热效应研究;Nd:CNGG;准三能级

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1102004

Thermal Effects Analysis of Nd:CNGG 935 nm Laser Pumped by 885 nm and 808 nm Diode Lasers

Shi Yuxian¹ Lu Tielin¹ Feng Baohua² Zhang Huaijin³ Yu Haohai³ Wang Jiyang³

¹School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

³State Key Laboratory of Crystal Material, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract The thermal lensing effects of 808 nm and 885 nm LD end-pumped Nd:CNGG 935 nm laser are investigated by experimental and theoretical methods. The thermal focal length of the laser pumped by 885 nm is about 6.8 times of the one pumped by 808 nm when the absorbed power reaches to 10 W. Meanwhile, the temperature gradient in crystal is smaller under 885 nm pumping. At the pump waist position, the maximal values of the crystal temperature under 885 nm and 808 nm pumping are 287.76 K and 310.05 K, respectively, in experiment. At the pump face, the maximal values of the crystal temperature under 885 nm and 808 nm pumping are 285.78 K and 317.18 K. Compared with the 808 nm pumping scheme, the slope efficiency increases by 43% (from 4.6% to 6.6%) with an 8% reduction (from 3.31 W to 3.05 W) in the oscillation threshold under 885 nm direct pumping scheme.

Key words lasers; 885 nm direct pumping; thermal effect; Nd:CNGG; quasi-three-level

OCIS codes 140.3480; 140.3530; 140.3580

1 引言

掺钕 $\text{Ca}_3(\text{NbGa})_{2-x}\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (Nd:CNGG) 晶体是一种典型的无序激光晶体。Nd:CNGG 晶体的准

三能级 935 nm 运转能够通过倍频获得蓝色激光光源,并且 935 nm 处于水蒸气的吸收峰,可以作为激光差分雷达的应用光源,对水蒸气进行探测。但是,

收稿日期: 2012-06-26; 收到修改稿日期: 2012-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(61108021)资助课题。

作者简介: 施玉显(1981—),女,博士,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: yxshi05@163.com

Nd:CNGG 的热导率较低,只有 Nd:YAG 的 1/3。同时,Nd³⁺ 准三能级运转的跃迁下能级有一定数量的热粒子数分布,因此存在重吸收损耗问题。重吸收损耗加上准三能级较小的发射截面,导致准三能级 Nd³⁺ 激光器具有较高的阈值、较低的斜效率和输出功率。因此,Nd³⁺ 准三能级激光器需要更高的抽运功率,晶体中的热负载更加严重,热透镜效应变得十分显著,影响谐振腔的稳定性和输出激光的光束质量。如何改善激光晶体的热效应成为获得性能良好的 Nd³⁺ 准三能级运转激光器件必须考虑的问题。

由波尔兹曼分布定律可知,在 Nd³⁺ 准三能级运转的跃迁下能级的热粒子数与晶体的温度相关,随温度的降低而减少。为了降低跃迁下能级的粒子数,改善准三能级激光器件的性能,激光器一般都工作在较低的环境温度下。这种单纯通过设置较低水冷温度降低晶体温度的方式,忽视了热量产生的本源,并且对晶体内的温度梯度没有影响,对晶体的热透镜效应改善作用非常有限。在全固态激光器中,激光晶体中的热负载的一个重要来源是:在抽运过程中抽运光光子能量与激光光子能量之间的能量差,也就是量子亏损^[1]。抽运上能级和激光上能级之间的无辐射跃迁在晶体内产生大量的热量,制约了激光器性能指标。885 nm 直接抽运技术是把 Nd³⁺ 从基态的 Stark 分裂能级直接抽运到激光上能级实现粒子数反转。该抽运方式不存在从抽运上能级向激光上能级之间的跃迁,从本源上使激光晶体中沉积的热量降低,从而降低了晶体的温度,减轻了晶体的热透镜效应。相对于传统的 808 nm 抽运技术,885 nm 直接抽运的优势已经在前期的文献当中得到了验证^[2~14]。在 Nd:CNGG 935 nm 激光器中,由于晶体较低的热导率和较小的发射截面,热效应成为制约激光器输出性能的主要因素,885 nm 直接抽运技术成为解决问题的有效手段。本文对比了在两种不同抽运方式下,晶体内部温度分布、激光晶体的热焦距以及激光器输出性能的差异。理论模拟和实验结果表明,885 nm 直接抽运方式有效改善了激光器的热负载:直接抽运方式下的晶体内部温度更低,温度梯度更小;相同实验条件下,晶体的热焦距大约是 808 nm 抽运方式下的 6.8 倍;激光器的斜率效率更高,阈值更低。

2 理论分析

2.1 激光晶体内部温度分布

激光二极管(LD)抽运光强度分布可以用沿激

光晶体方向呈轴对称分布的高斯分布描述,考虑激光晶体的吸收,沿抽运光传播方向为 Z 轴,晶体端面为 XY 平面建立坐标系,则抽运光的分布模型可以表示为^[15]

$$I(x, y, z) = \frac{2\alpha}{\pi\omega_p^2[1 - \exp(-\alpha l)]} \times \left[\exp - \frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2} \right] \exp(-\alpha z), \quad (1)$$

式中 α 是激光晶体在抽运波长处的吸收系数, l 是晶体长度, ω_p 是抽运光斑半径,可以表示成如下形式:

$$\omega_p = \omega_0 + \theta |z - z_0|, \quad (2)$$

式中 ω_0 是束腰半径, z_0 是束腰所在位置, θ 是光束的发散角。

晶体内产生的热量与晶体吸收功率 P_{abs} 之间的关系可以表示成如下形式:

$$Q = \eta P_{\text{abs}}, \quad (3)$$

式中 η 为生热效率。在低掺杂浓度 Nd:CNGG 中, η 可以表示为

$$\eta = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_L}, \quad (4)$$

式中 λ_p 为抽运光波长, λ_L 为激光波长。

因此,晶体内产生的热量密度分布可表述为

$$q(x, y, z) = \frac{2\alpha Q}{\pi\omega_p^2[1 - \exp(-\alpha l)]} \times \left[\exp - \frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2} \right] \exp(-\alpha z), \quad (5)$$

在 LD 端面抽运方式下,晶体中的热量主要是沿径向通过侧面向外扩散,如果忽略轴向的热扩散,则晶体内部的温度分布 $T(x, y, z)$ 和边界条件满足以下方程:

$$K_c \left(\frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2} \right) T(x, y, z) = -q(x, y, z), \\ T|_s = T_0, \quad (6)$$

式中 T_0 是热沉的设定温度, K_c 是晶体的导热系数。

设定晶体吸收功率 P_{abs} 为 10 W,晶体长度 $l = 8$ mm,热沉温度 $T_0 = 278$ K,抽运光束腰半径 $\omega_0 = 200$ μm ,束腰位置为 $z_0 = 2$ mm,抽运光发散角 $\theta = 0.11^\circ$ 。晶体在 808 nm 和 885 nm 处的吸收系数分别为 2.64 cm^{-1} 和 0.5 cm^{-1} 。晶体热传导系数 $K_c = 3.4 \text{ W/mK}$ ^[16]。利用有限差分法,可以解出晶体内部温度分布如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,在束腰处,在 885 nm 和 808 nm 抽运方式下,晶体内的温度最高分别为 287.76 K 和 310.05 K。在抽运端面位置,在 885 nm 和 808 nm 抽运方式下,晶体内的温度最高分别为

285.78 K 和 317.18 K。较低的晶体温度使准三能级结构跃迁下能级上的热粒子数减少,可以在一定程度上降低激光器的阈值,提高输出功率。并且从

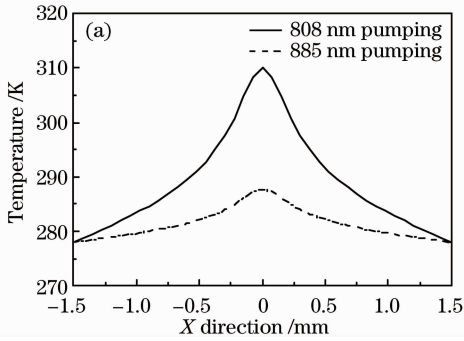


图 1 中可以看出,885 nm 抽运方式下晶体内部的温度梯度更小。计算结果表明,885 nm 直接抽运方式有效缓解了晶体内的热负载。

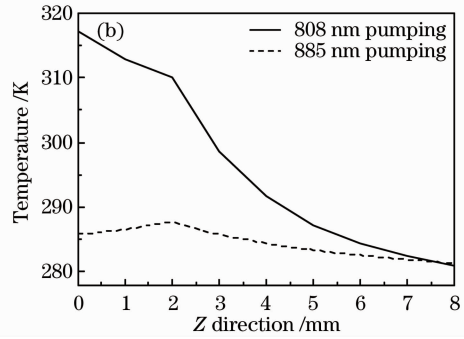


图 1 (a)激光晶体沿 X/Y 方向温度分布;(b)激光晶体沿 Z 方向温度分布

Fig. 1 (a) Temperature distribution in laser crystal along X/Y direction; (b) temperature distribution in laser crystal along Z direction

2.2 晶体热透镜焦距

在端面抽运全固态激光器中,激光晶体的有效热透镜焦距可以表述成如下形式^[17]:

$$f = \left[\frac{\pi k_c \omega_0^2}{\eta P_{\text{abs}} (dn/dt)} \right] \left[\frac{1}{1 - \exp(-al)} \right], \quad (7)$$

式中热光系数 $dn/dt = 9.2 \times 10^{-6} / \text{K}$ ^[14]。(7)式的计算结果和实验测量的热透镜焦距数值如图 2 所示。

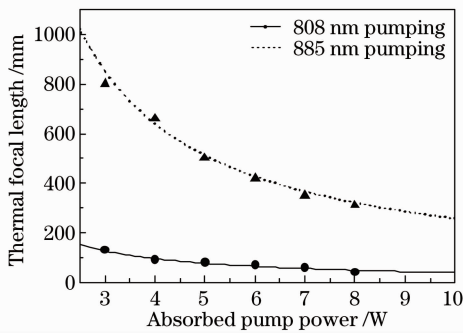


图 2 激光晶体的有效热焦距与吸收抽运功率的关系。

曲线为数值模拟结果,点为实验结果

Fig. 2 Relationship between effective focal length of thermal lens and input pump power. Symbols represent experimental data and curves are theoretical fitting results

从图 2 中可以看出,两种抽运方式下,晶体的热焦距都随抽运功率的增大而减小,晶体的热透镜效应逐渐明显。在相同的抽运功率下,由于 808 nm 较高的量子亏损产生更多的热量,其热透镜焦距比 885 nm 抽运方式下的晶体热焦距小得多。实验结果和数值模拟结果表明,885 nm 直接抽运方式使晶体的热透镜效应得到改善,激光谐振腔的稳定性和光束质量得以提高。

3 实验装置

准三能级 Nd:CNGG 935 nm 激光器结构如图 3 所示。激光谐振腔采用平平腔结构,腔长 14 mm,实验中所用的 Nd:CNGG 晶体长度为 8 mm, Nd^{3+} 离子数分数为 0.5%,在 800~1100 nm 波段镀高透膜。808 nm 和 885 nm 抽运源为光纤耦合输出的 LD,光纤芯径 400 μm ,数值孔径为 0.22。抽运光纤光纤耦合输出经过 2:1 耦合系统耦合到 Nd:CNGG 晶体内部。耦合镜 M1 为平面镜,镀膜为 808 nm 和 885 nm 高透,935 nm 高反,同时为了抑制四能级起振,镀 1061 nm 增透膜。输出耦合镜 (OC) 为在 935 nm 处透射率为 2% 的平面镜。Nd:CNGG 晶体被包裹在铝箔中,放置在紫铜水冷架上,水冷温度设置在 5 $^{\circ}\text{C}$ 。激光输出波长用光纤光谱仪 (SpectraPro 500i) 测量。输出功率由功率计测量,同时为了避免抽运光对测量结果的影响,功率计放置在离输出镜较远处的位置 (53 cm)。在实验中,主要考虑两种抽运方式下激光器件的热特性差异以及激光输出性能的差异。M1 镜片靠近激光棒一端

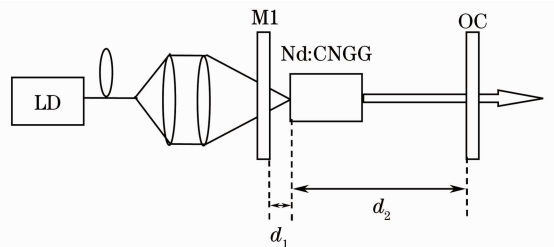


图 3 光学谐振腔结构与抽运装置

Fig. 3 Schematic representation of optical resonator and pumping setup

(d_1 很小,与热透镜相比可忽略),OC 可沿激光方向前后移动。当腔长大于等于晶体热透镜焦距时,激光谐振腔变为非稳腔,激光输出功率开始降低直到无激光输出。在测量热焦距的过程中,首先在激光器阈值附近优化激光器件,然后在移动 OC 的过程中不再对腔进行优化。

4 实验结果与分析

准三能级 Nd:CNGG 935 nm 激光器的输入输出功率如图 4 所示,横坐标为晶体的吸收功率,激光晶体吸收的抽运光是通过微瓦功率计测量晶体前后功率差异得到的。通过对输入输出功率的线性拟合得到激光器的斜效率。为了比较两种抽运方式下激光晶体的热透镜效应和激光器输出性能的差异,除了抽运波长不同外,其余实验条件一样。对实验数据拟合后得到 885 nm 和 808 nm 抽运方式下的准三能级 Nd:CNGG 激光器的输出斜效率分别为 6.6% 和 4.6%,斜率效率提高了 43%;激光阈值分别 3.05 W 和 3.31 W,降低了 8%。从实验结果看,激光器的输出性能得到了提高。但是需要注意的是,由于 Nd:CNGG 晶体的选择激发性特性和准三能级重吸收问题,导致激光器效率偏低。同时在实验中未对输出镜透射率进行优化,只是比较了同等实验条件下两种抽运方式对激光器的影响,这也影响了激光器的输出性能。

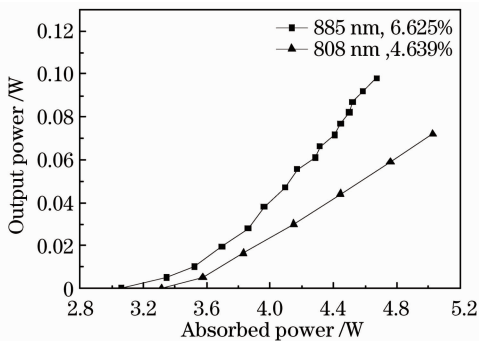


图 4 在 808 nm 和 885 nm 抽运方式下,935 nm Nd:CNGG 激光器吸收功率与输出功率的关系

Fig. 4 Output power versus absorbed pump power for 935 nm Nd:CNGG laser under 808 nm and 885 nm pumping

在不同抽运方式下,实验中测量的激光晶体的热焦距随晶体吸收抽运功率的变化规律如图 2 所示。图 2 中数据点为实验中测量得到的热透镜焦距,曲线为理论模拟的结果。885 nm 直接抽运方式下,当晶体吸收抽运功率为 10 W 时,晶体的热透镜

焦距大约是 808 nm 抽运方式下的 6.8 倍,晶体的热效应得到有效改善。

相对于 808 nm 抽运光波长,885 nm 的量子亏损小,由于无辐射跃迁过程产生的热量少,从本质上缓解了激光晶体的热负载,尤其对于准三能级结构的激光器件更是降低了跃迁下能级的热粒子数,重吸收损耗较少,改善了激光器的输出性能。同时,Nd³⁺ 离子在 885 nm 处的吸收系数小,对该波长较低的吸收系数意味着在晶体中有较长的光路,晶体内部温度分布较均匀,这有利于高功率激光器以及散热性能较差的激光器件更好地散热和降低热负载。从图 1 中可以看出,无论是纵向还是横向,885 nm 抽运方式下的晶体内部温度分布更加均匀,温度梯度小。直接抽运方式的优势在高功率准三能级激光器件中的优势会更加明显。

5 结 论

从实验和理论两方面分析了 808 nm 和 885 nm 两种不同抽运方式下准三能级 Nd:CNGG 935 nm 激光器的热特性和输出性能的差异。与 808 nm 常规抽运方式比较,直接抽运方式有如下优势:激光器阈值降低了 8%,斜率效率提高了 43%;晶体吸收抽运功率为 10 W 时,晶体热透镜焦距明显变长;晶体内部温度分布在纵向和横向上温度更低、温度梯度更小,在纵向束腰处,晶体最高温度分别为 287.76 K 和 310.05 K,在抽运端面,晶体最高温度分别为 285.78 K 和 317.18 K。实验结果和理论分析表明,885 nm 直接抽运方式在改善晶体热负载和激光器输出性能方面有一定优势。由于热负载的改善,准三能级结构中激光跃迁下能级的热粒子数减少,减轻了重吸收损耗,改善了激光器的输出性能。

参 考 文 献

- 1 D. C. Brown. Heat, fluorescence, and stimulated-emission power densities and fractions in Nd:YAG[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(3): 560~572
- 2 Y. F. Lue, J. Xia, X. H. Zhang *et al.*. Quasi-three-level Nd:LuVO₄ laser under diode pumping directly into the emitting level [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(2): 120~123
- 3 R. Lavi, S. Jackel. Thermally boosted pumping of neodymium lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(18): 3093~3098
- 4 N. Pavel, V. Lupei, J. Saikawa *et al.*. Neodymium concentration dependence of 0.94-, 1.06- and 1.34- μ m laser emission and of heating effects under 809- and 885-nm diode laser pumping of Nd:YAG [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**(4): 599~605
- 5 Nan Zong, Fangqin Li, Lin Han *et al.*. 4.6-W compact and efficient NdAl₃(BO₃)₄ thin-disk laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(11): 111402

- 6 N. Zong, X. Zhang, Q. Ma *et al.*. Comparison of Nd:YAG ceramic laser pumped at 885 nm and 808 nm[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(5): 054211
- 7 V. Lupei, G. Aka, D. Vivien. Quasi-three-level 946 nm CW laser emission of Nd:YAG under direct pumping at 885 nm into the emitting level [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **204**(1-6): 399~405
- 8 Yanfei Lü, Jing Xia, Junguang Wang *et al.*. Highly efficient Nd:YAG/LBO laser at 473 nm under direct 885-nm diode laser pumping[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 187~189
- 9 V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. Highly efficient continuous-wave 946-nm Nd:YAG laser emission under direct 885-nm pumping [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(15): 2677~2679
- 10 V. Lupei, N. Pavel, T. Taira. Laser emission in highly doped Nd:YAG crystals under $^4F_{3/2}$ and $^4F_{3/2}$ pumping[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1678~1679
- 11 S. Bjurshagen, R. Koch, F. Laurell. Quasi-three-level Nd:YAG laser under diode pumping directly into the emitting level [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **261**(1): 109~113
- 12 N. Pavel, K. Lünstedt, K. Petermann *et al.*. Multipass pumped Nd-based thin-disk lasers: continuous-wave laser operation at 1.06 and 0.9 μm with intracavity frequency doubling[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(34): 8256~8263
- 13 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Single-end pumping, single-frequency Nd:YVO₄/LBO laser with output power of 21.5 W[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602011
郑耀辉, 王雅君, 彭堃焯. 输出功率为 21.5 W 的单端抽运 Nd:YVO₄/LBO 单频激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602011
- 14 Ai Qingkang, Chang Liang, Chen Meng *et al.*. Thermal analysis of Nd:YVO₄ pumped by 808 nm and 888 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402001
艾庆康, 常亮, 陈檬等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO₄ 热效应分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402001
- 15 T. Y. Fan, R. L. Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(6): 895~912
- 16 Y. G. Yu, J. Y. Wang, H. J. Zhang *et al.*. Thermal characterization of lowly Nd³⁺ doped disordered Nd:CNGG crystal[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 9270~9275
- 17 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl.. Beijing: Science Press, 2002. 409
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 409

栏目编辑: 宋梅梅