

文章编号: 1001-5078(2006)05-0348-03

# 端面泵浦 Nd:YAG 连续输出 1052nm 波长激光器

汪玉树<sup>1</sup>, 许惠英<sup>2</sup>, 蔡志平<sup>2</sup>, 黄剑平<sup>2</sup>, 刘孙丽<sup>1</sup>, 罗正钱<sup>1</sup>, 林国平<sup>1</sup>

(1. 厦门大学物理学系; 2. 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 设计了一个简单紧凑的 1052nm 波长激光器。首次利用激光二极管(LD)端面泵浦 Nd:YAG 晶体, 使用镀有高度选择性介质膜的反射镜产生该波段的激光。激光阈值为 0.3W, 当 808nm 波长泵浦光功率达到 18W 时产生了 3.5W 的 1052nm 波长激光输出。光-光转换效率为 20%, 输出激光功率波动不超过 3%。

**关键词:** 1052nm 波长; Nd:YAG; 端面泵浦

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Laser Diode End-pumped 1052nm CW Nd:YAG Laser

WANG Yu-shu<sup>1</sup>, XU Hui-ying<sup>2</sup>, CAI Zhi-ping<sup>2</sup>,HUANG Jian-ping<sup>2</sup>, LIU Sun-li<sup>1</sup>, LUO Zhen-qian<sup>1</sup>, LIN Guo-ping<sup>1</sup>

(1. Department of physics Xiamen University Xiamen 361005 China

2. Department of Electronic Engineering Xiamen University Xiamen 361005, China)

**Abstract** In this paper we have demonstrated a compact and simple design for LD end-pumped CW laser at 1052nm with Nd:YAG crystal in the flat-curved cavity. The maximum output power of laser is 3.5W at 1052nm when the absorbed pumping power is 18W, and the optical-to-optical conversion efficiency is 20%. The threshold of the laser is about 0.3W. The stability of output power is 3% within 2 hours.

**Key words** 1052nm laser Nd:YAG; LD-end-pumped

### 1 引言

二极管泵浦固态激光器(DPSSL)由于其效率高、光束质量好、体积小、寿命长、稳定性好等优点,在测量、遥感、数据存储、医学等领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。Nd:YAG 激光晶体具有较高的热导率、易于散热、热畸变小、破坏阈值较高、工作范围宽、工艺技术成熟及商品化程度高等优点,使得 Nd:YAG 激光器成为目前应用最为广泛的固体激光器<sup>[2-6]</sup>。但目前对 Nd:YAG 的研究大部分都集中在 1.06 $\mu$ m 波段,对 1052nm 波长的研究国内尚未见过报道,国外有报道过利用氪灯侧面泵浦 Nd:YAG 晶体,并利用腔内放置角度调谐标准具来抑止其他波长振荡实现 1052nm 波长输出<sup>[5]</sup>。采用半导体激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 晶体,并利用反射镜上镀合适的膜实现 1052nm 波长激光输出尚属首次。

### 2 能级结构

图 1 为 Nd:YAG 晶体的 Nd<sup>3+</sup> 能级图<sup>[4]</sup>,它是以三价钕离子作为激活粒子的四能级系统。基态<sup>4</sup>I<sub>3/2</sub>

钕离子吸收泵浦光子能量后,跃迁到泵浦高能级<sup>4</sup>F<sub>7/2</sub>、<sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>、<sup>4</sup>F<sub>5/2</sub>和<sup>2</sup>H<sub>9/2</sub>,而后几乎全部经无辐射跃迁迅速下降到寿命为 0.23ms 的亚稳态能级<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>(激光上能级)。图 1 中可以看到波长为 1052nm 的激光跃迁始自<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>能级的 R<sub>2</sub> 分量,中止于<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>的 Y<sub>1</sub> 分量。由文献[4]知道,1064.1nm 波长跃迁的受激发射界面为  $45.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,而 1052nm 跃迁的受激发射界面为  $15.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,仅为前者的 1/3。图 2 为 Nd:YAG 晶体的 Nd<sup>3+</sup> 发射谱,从图中看到在 1052nm 处发射强度约为 1064.1nm 处的 1/3。因此在正常工作条件下, Nd:YAG 激光器在室温时以最强的<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>跃迁产生 1.064 $\mu$ m 波长的振荡,要得到 1052nm 波长激光的输出,必须抑制 1064nm 波段的振荡。一般可以采用如下几种方法获得特定

基金项目:福建省重大基金(2002F011, 2004HZ01-1-3);厦门大学 985 工程科技创新平台基金资助。

作者简介:汪玉树(1980-),男,硕士研究生。

收稿日期:2005-09-23

波长的激光输出<sup>[3]</sup>:

- (1) 谐振腔中插入标准件具或色散棱镜;
- (2) 以特殊设计的谐振腔反射镜作为输出镜;
- (3) 使用镀有高度选择性介质膜的反射镜。

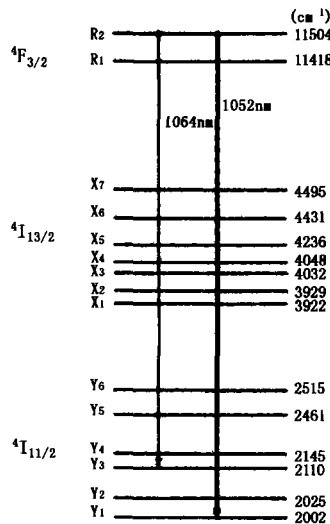


图 1 Nd:YAG 能级图

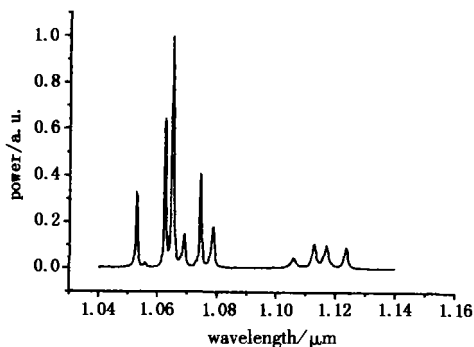


图 2 Nd:YAG 的发射谱

这些方法抑制其它不需要的波长的激光振荡, 而提供所需波长振荡。1052nm 相当靠近 1064nm 和 1061.4nm 这两条最强谱线。为了能抑制这两条最近且最强的谱线, 实验中采用第三种方法, 即采用特殊的膜系设计, 使得输出耦合镜的透射率在 1064nm 和 1061nm 处要比在 1052nm 处大得多, 导致它们的激光起振阈值比 1052nm 大, 这样, 使得在 1052nm 处谱线通过竞争, 首先达到激射, 从而抑制了 1064nm 和 1061nm 这两条最强的谱线产生激射, 产生 1052nm 这一波长激光。

### 3 实验设计

实验中采用光纤耦合端面泵浦方式。采用端面泵浦方式, 能使得泵浦光与激光之间模式空间交叠好, 抽运能量利用效率高。实验装置如图 3 所示, Nd:YAG 晶体放置在导热性能相当好的铜套内, 通过半导体制冷片 TEC 控制其温度, 利用风扇和散热片将半导体制冷片热面的热量带走, 散热结构相当紧凑。晶体温度控制在 17℃, 腔长 50mm 晶体与

M1 之间的距离约 3mm。Nd:YAG 参数: 掺杂浓度 1.1%, 尺寸为 Φ4×4mm。输出镜 M2 的曲率半径 R = -100mm, 输入镜 M1 为一平面镜, 尺寸为 10×10×2mm<sup>3</sup>。Nd:YAG 晶体注入端镀有对 808nm 增透的膜系, 提高泵浦光的注入效率。泵浦源为 LMO-30W LD, 在室温下, 发射中心波长为 808nm。

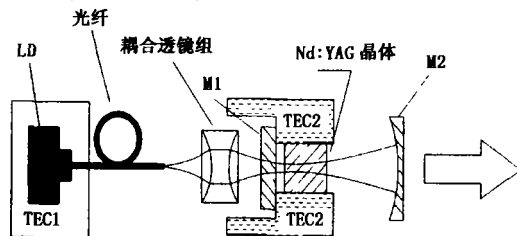


图 3 实验装置示意图

从光纤出来的 LD 激光是发散的, 如果直接注入增益介质, 则泵浦光与振荡光无法实现很好的交叠, 会降低泵浦效率, 使激光阈值升高。改进方法是, 利用耦合透镜组对泵浦光进行聚集后再注入工作介质。耦合透镜组由两个凸面相对的平凸形凸面镜组成, 焦距均为 1cm。泵浦光经过准直聚焦系统后会聚成直径为 200μm 的聚焦光斑, 经过 M1 注入到工作物质内部。

对于腔体, 选取对热效应较不敏感的、有大可控模体积的平凹稳定腔结构, 有效地补偿了 LD 泵浦固体激光器的热透镜效应, 提高了激光器性能和输出稳定性。M1 镀了对 808nm 增透膜, 1052nm 高反膜, 1064nm 增透膜, 从而抑制了 1064nm 波长光的起振。M1、M2 的反射频谱分别如图 4 和图 5 所示: M1 对 1052nm 的反射率为 95.8%, 透射率为 4.2%; M2 对 1052nm 的反射率为 98.5%, 透射率为 1.5%。

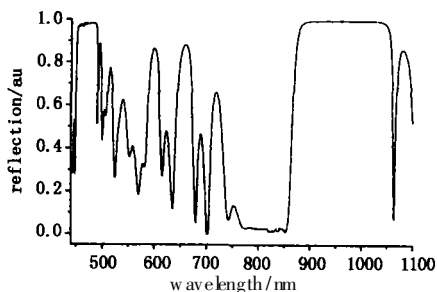


图 4 M1 对各波长光的反射率

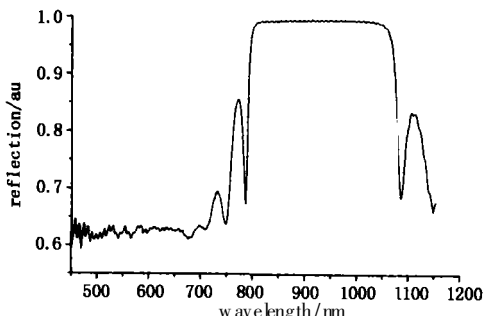


图 5 M2 对各波长光的反射率

当激光器工作于高功率状态时,激光晶体的热透镜效应会严重影响腔体结构,晶体温度的不稳定会直接带来热焦距的不稳定<sup>[8]</sup>,最终影响激光输出。如果室温恒定,TEC 电流恒定,则晶体温度能维持稳定,但如果室温变化或工作地点改变,晶体温度必然改变。实验通过在单片机中实现 PID 算法控制 TEC 电流,进而控制 TEC 的制冷量,使得室温改变不影响晶体温度,也不影响激光输出,温度控制精度达 0.1℃。

#### 4 实验结果

图 6 给出了输出功率随泵浦功率变化情况,当注入功率达到 0.3W 时开始有激光输出,即达到激光阈值。当泵浦功率为 18W 时,输出达 3.5W。从图上可知输入输出关系基本上为线性,斜效率约 20.7%。考虑到 M1 对 1052nm 的透射率为 4.2%,而 M2 对 1052nm 的透射率为 1.5%,M1 的透射率是 M2 的 2.8 倍,因此通过 M1 输出的 1052nm 波长激光功率为 9.8W,可计算得到两个镜子总输出功率达 13.3W。

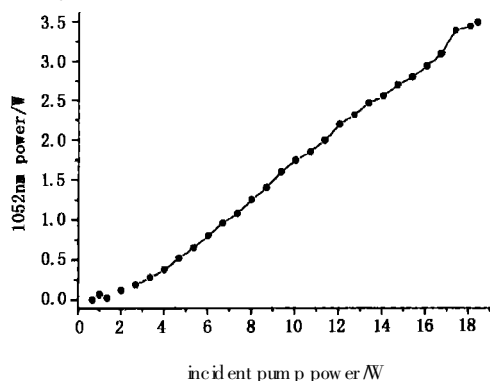
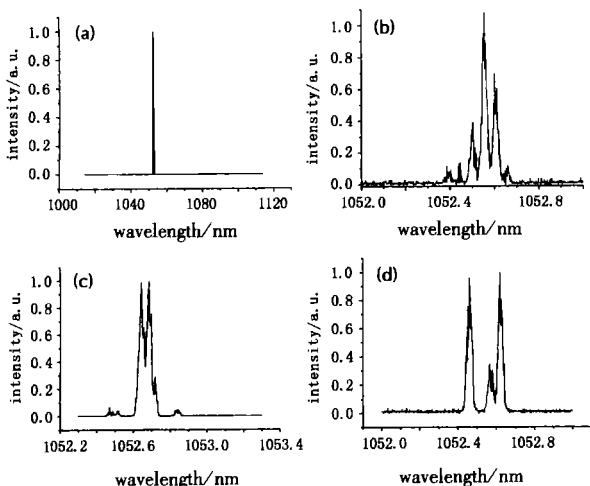


图 6 输出功率随泵浦功率变化曲线



(a) 仪器分辨率为 0.2nm; (b)、(c)、(d) 仪器分辨率为 0.01nm

图 7 1052nm 输出激光的光谱图

图 7 (a) 为光谱分析仪 (OSA) 的分辨率为 0.2nm 时测得的 1052nm 激光光谱,可见激光的峰值波长为 1052.6nm,激光谱线宽度约 0.2nm。当该仪

器的分辨率为 0.01nm,不同时间测得的激光光谱如图 7 (b)、(c)、(d) 所示,由于腔内各纵横之间存在竞争,导致测得的光谱图不断变化。理论腔内相邻纵模频率间隔为<sup>[7]</sup>:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2[L + (n-1) \times l]} \quad (1)$$

其中, L 为腔长; n 为 Nd:YAG 折射率; l 为 Nd:YAG 晶体长度。由  $\nu\lambda = c$  可得:

$$|\Delta\nu| = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (2)$$

由 (1)、(2) 得  $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2[L + (n-1) \times l]} \times 0.0104\text{nm}$ , 与实验中仪器的最小分辨率 0.01nm 相差无几,因此无法从图 7 的几个光谱图分辨出相邻纵模。

#### 5 总结

实验首次通过使用既有特殊膜系设计的反射镜抑制了 1064nm 等波长的振荡,利用端面泵浦实现了 1052nm 波长激光的连续运转。实验中 M1 对 1052nm 波长的透射率是输出镜 M2 的 2.8 倍,因此可以预见进一步提高输出功率的可能,例如可提高 M1 对 1052nm 波长的反射率,使其接近全反。另外,不仅仅对 1052nm 波长而言,对其他波长,也可以通过合适的膜系设计来达到该波长运转输出。进一步的实验正在进行当中。

#### 参考文献:

- [1] T Y Fan, R L Byer. Diode Laser pumped solid-state lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24(6): 895-912
- [2] Yao Jianquan. Nonlinear Optical Frequency Transformation and Laser Tuning Technology [M]. Beijing: Beijing Scientific Press, 1995, 109-139 (in Chinese).
- [3] (美) W 克希耐尔著; 孙文, 江泽文, 程国祥译. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [4] S Singh, R G Smith, L G Van Uitert. Stimulated emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature [J]. Phys Rev, B1974, 10: 2566-2572
- [5] JACK MARLING. 1.05-1.44μm tunability and performance of the CW Nd<sup>3+</sup> YAG laser [J]. IEEE J Quantum Electron, 1978, 14(1): 56-61
- [6] 杨遇春. YAG 固体激光器与激光材料加工 [J]. 激光与红外, 1997, 27(6).
- [7] 周炳琨, 等. 激光原理 [M]. 第四版. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [8] M E Innocenzi, H T Yura, C L Fincher et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state lasers [J]. Appl Phys Lett, 1990, 56(19): 1831-1833
- [9] K IMartin, W A Clarkson, D C Hanna. High-power single-frequency operation at 1064nm and 1061.4nm of a Nd:YAG ring laser end-pumped by a beam-shaped diode bar [J]. Optics communications, 1997, 135: 89-92