

# LD 抽运 Nd·YVO<sub>4</sub> 腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器\*

何京良<sup>1,2</sup> 侯 玮<sup>1</sup> 张恒利<sup>1</sup> 李 健<sup>2</sup> 王建明<sup>1</sup> 许祖彦<sup>1</sup> 杨国桢<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院物理研究所光物理实验室 北京 100080; <sup>2</sup> 山东师范大学物理系现代光学实验室 济南 250014)

**提要** 报道了用 LD 双向抽运 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体, KTP 作腔内倍频的大功率绿光激光器。通过对大功率抽运情况下所产生的热透镜效应进行分析和估算, 优化了热稳腔参数, 获得了较稳定的功率输出。在抽运功率为 28 W 时, 获得最大连续波绿光输出 8.8 W, 光-光转换效率达 31.5%。

**关键词** LD 抽运, Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器, 腔内倍频, 热透镜效应

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的全固态大功率连续波绿光激光器由于具有效率高、体积小、稳定性好和寿命长等优点, 在医疗卫生、潜卫通讯和大屏幕彩色显示等领域有着重要的应用前景。5 W 以上的全固态绿光激光器已可取代结构庞大、效率极低的氩离子激光器, 用来抽运钛宝石, 实现自锁模超快脉冲输出<sup>[1]</sup>。

近几年, Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体相对于常用的 Nd·YAG 来说, 具有发射截面大、吸收带宽和输出为线偏振等优点, 成为 LD 抽运的全固态激光器中常用的激光晶体。文献[2]曾报道了用 LD 抽运 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体获得 5.5 W 绿光输出; 在 1998 年 CLEO 会议上, Takao Izawa 等<sup>[3]</sup>报道了用 30 W LD 非光纤耦合抽运 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体, LBO 腔内倍频, 获得连续波 TEM<sub>00</sub> 模 7 W 绿光输出。

在大功率 LD 抽运情况下, 由于 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体的导热性能较差, 增益介质产生的热透镜效应将严重影响腔的稳定性和输出功率的提高, 因此, 在热稳腔的设计过程中必须将热透镜考虑在内。

## 2 实验装置

实验中采用四镜 Z 型腔结构, 装置图如图 1 所示。为了减少单端高功率抽运造成增益介质吸收不均匀, 我们采用双向抽运。抽运源是最大输出功率为 15 W 带光纤耦合输出的半导体激光器(型号为: OPC-B015-FCPS)。在 25℃时, 中心发射波长分别为 810.1 nm 和 809.6 nm。通过设定它们的工作温度, 使其工作波长为 808.7 nm, 与 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体吸收峰相匹配。光纤输

\* 国家高技术研究发展计划资助课题(批准号: 863-715-001-00)。

收稿日期: 1999-02-01; 收到修改稿日期: 1999-03-29

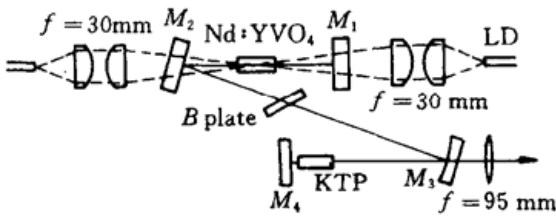


图 1 LD 抽运 Nd·YVO<sub>4</sub> KTP 腔内倍频绿光激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic of the diode-pumped intracavity-doubled Nd·YVO<sub>4</sub>/KTP laser

出束口径为 1.15mm, NA = 0.1, 发散角为 12° (全角)。LD 与腔之间的耦合采用了一传输效率为 92% 的准直聚焦系统 ( $f = 30\text{mm}$ ), 将抽运光聚焦为 700  $\mu\text{m}$  左右光斑。 $M_1$  和  $M_2$  是抽运光耦合平面镜, 一面镀 808 nm 增透膜, 另一面镀 808 nm 的增透膜 ( $T > 96\%$ ) 和 1.064  $\mu\text{m}$  的高反膜 ( $R = 99.8\%$ );  $M_3$  是曲率半径为 100 mm 的平-凹镜, 凹面镀有 1.064  $\mu\text{m}$  高反膜和 532 nm 增透膜, 平面对 532 nm 镀高透膜; 端镜  $M_4$  是一平面镜, 镀 1.064  $\mu\text{m}$  和 532 nm 双色高反膜。

实验中所用 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体为中国科学院物理所生长, 大小为 4 mm × 4 mm × 8 mm, 掺杂浓度为 0.5%。实验证明: 低掺杂的增益介质更适合于大功率抽运。为防止两通光面形成标准具效应产生自激振荡, 将一通光面切成 2° 的劈形。晶体侧面镀金, 用铝箔包裹晶体放入水冷紫铜块中, 保持较好的热接触。晶体两通光面皆镀有对 808 nm 和 1.064  $\mu\text{m}$  的增透膜。 $M_2$  和  $M_3$  之间放置一布儒斯特片是为了补偿因腔的折叠 (折叠角  $\theta \approx 12^\circ$ ) 而产生的像散。KTP 晶体紧靠端镜  $M_4$  放置, 采用一类角度匹配 ( $\theta = 90^\circ, \varphi = 23.4^\circ$ ), 大小为 3 mm × 3 mm × 8 mm, 两通光面皆镀有 1.064  $\mu\text{m}$  和 532 nm 双色增透膜。随抽运光功率的变化,  $M_4$  的前后位置要做少许平移以调整腔的热稳定性。

### 3 热稳腔的分析研究

在端面抽运时, 可将激光晶体视为一薄透镜, 它的热焦距可表示为<sup>[4]</sup>

$$f_T = \frac{\pi K_c w_p^2}{P_{ph} (dn/dT)} \left[ \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (1)$$

其中,  $K_c$  为热传导系数;  $w_p$  为抽运光光斑半径;  $P_{ph}$  为抽运功率中作为热沉积在晶体内的一部分功率 (大约占总功率的 20%);  $dn/dT$  为折射率随温度的变化率;  $\alpha$  为吸收系数;  $l$  为激光晶体长度。

对掺杂浓度为 0.5% 的 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体,  $K_c = 0.054 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ ,  $\alpha = 14.8 \text{ cm}^{-1}$ ,  $dn/dT = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6} / \text{K}$ ,  $l = 8 \text{ mm}$ 。当抽运光功率太大或抽运光光斑半径太小都将使热焦距变短, 因此实验中当用大功率 LD 抽运时, 在基本满足与腔模相位匹配条件下, 抽运光的束腰半径应该尽量增大以减少热效应。

根据上面给出的参数, 可计算得到当抽运光为 20 W 时, 热焦距大约为 15 cm 左右。当抽运光功率为 25~26 W 时, 热焦距大约为 12 cm 左右。这个尺寸已经和典型的 LD 抽运固体激光器腔的尺寸相当, 因此, 热效应将严重影响腔的稳定性。将激光晶体等效为一焦距为 12 cm 的薄透镜, 对四镜 Z 型腔腔参数的选取进行了分析。设  $M_1, M_2$  到 Nd·YVO<sub>4</sub> 晶体的距离都为  $l_1$ ,  $M_2$  到  $M_3$  的距离为  $l_2$ ,  $M_3$  到  $M_4$  的距离为  $l_3$ , 根据折叠腔理论, 选取  $l_1 = 33 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 255 \text{ mm}$ ,  $R = 100 \text{ mm}$ , 经计算可知: 热焦距不同时对腔参数特别是激光晶体和倍频晶体上的光斑大小影响很大。随着热效应变大、热焦距变短, 谐振腔从一个稳区转移到了另一个稳区, 输出光束变粗, 腔参数  $l_3$  也要相应地变大。图 2 给出了输出镜上光斑半径与热焦距及  $l_3$  的关系。

从图 2 中可以看出:当抽运光功率较大、热焦距较短时,  $l_3$  应取大于 65 mm 的值,且热焦距越短,稳定区越窄。实验中,也观察到存在两个稳区。当抽运光功率低于 18 W 时,输出是稳定的;在抽运光功率为 20~24 W 附近跳动很大,输出很难稳定下来,且增长也没有一定的规律;当抽运光功率为 24~28 W 时,则进入第二个稳区,输出功率增长较快,也较为稳定。

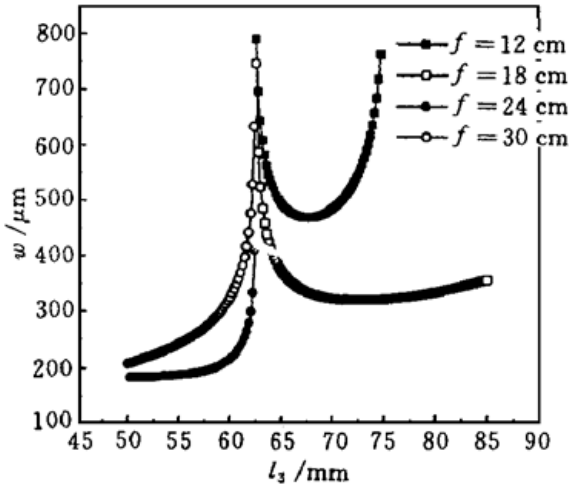


图 2 折叠镜  $M_3$  上的光斑大小与  $l_3$  的关系

Fig. 2 Spot size  $w$  at mirror  $M_3$  as a function of  $l_3$

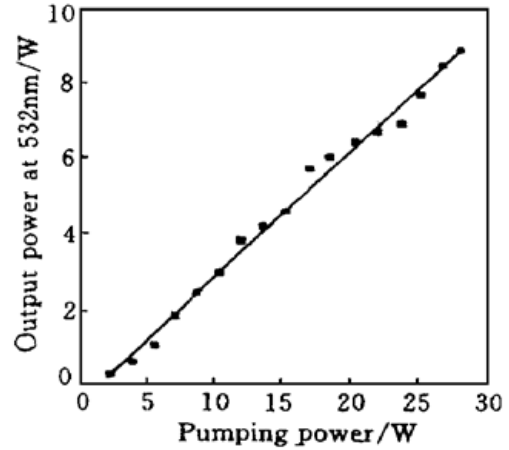


图 3 532 nm 绿光激光器的输入输出关系

Fig. 3 532 nm output power as a function of diode pump power at 808 nm

## 4 实验结果

根据以上分析选取合适的谐振腔参数。在大功率抽运情况下,精细地调节  $l_3$  使激光器工作在热稳腔的稳定区内。当两台 LD 总输出功率(在光纤出口处)为 27.9 W 时,获得 8.8 W 绿光输出,光-光转换效率为 31.5%,输入输出曲线如图 3 所示。

在激光器输出功率 6.5 W 附近,其转换效率最高为 34.5%,考虑到准直聚焦系统 92% 的传输效率,则抽运光注入功率与绿光输出的转换效率达 37.5%。此结果在目前国内外大功率连续波全固态绿光激光器转换效率方面处于领先水平。

在绿光输出功率为 5.3 W 附近,对它的稳定度进行了测试。每间隔 1 min 从功率计读出它的功率(功率计型号为 ALM-95 II 型)。这 11 个数据为:

5.36, 5.32, 5.31, 5.27, 5.26, 5.26, 5.22, 5.17, 5.22, 5.19, 5.16

平均值  $P = 5.25$  W, 求方均根误差

$$\Delta P = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{11} (P_i - P)^2}{n} \right]^{1/2} = 0.061$$

由此可求出 10 min 内功率稳定度  $\Delta P/P$  为 1.2%。在绿光输出为 8.1 W 附近进行了类似的测量,测得 8 min 内稳定度为 1.35%。由于“绿光噪声”问题没有解决,所以稳定度很难优于 1%。

## 参 考 文 献

- 1 Wei Zhiyi, Chen Yuchan, Li Jian *et al.*. All-solid-state operation of self-mode locking Ti:sapphire laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, 18(7): 960 (in Chinese)

- 2 He Jingliang, Hou Wei, Zhang Hengli *et al.*. Continuous wave output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of a Nd:YVO<sub>4</sub> laser. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(6): 418~ 419
- 3 Takao Izawa, Ryuji Uchimura, Shigenori Matsui *et al.*. Efficient diode-bar-pumped intracavity-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser using stacked-glass plate beam shaper. CLEO '98 CTHA OSA Technical Digest Series, 1998. Vol. 12, 322
- 4 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19): 1831~ 1833

## 8.8 W Green Laser by Intracavity Frequency Doubling of a LD Pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Laser

He Jingliang<sup>1,2</sup> Hou Wei<sup>1</sup> Zhang Hengli<sup>1</sup> Li Jian<sup>2</sup>

Wang Jianming<sup>1</sup> Xu Zuyan<sup>1</sup> Yang Guozhen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

<sup>2</sup>Laboratory of Modern Optics, Shandong Normal University, Jinan 250014

**Abstract** A maximum of 8.8W of cw TEM<sub>00</sub> mode output at 532 nm has been obtained by intracavity frequency doubling with KTP in a Nd:YVO<sub>4</sub> laser doubly-pumped with 28 W diode pumping power. The optical-optical conversion efficiency is 31.5%. The influence of thermal lensing at high pumping power in the end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser is discussed. The Nd:YVO<sub>4</sub> laser has good power stability.

**Key words** LD pump, Nd:YVO<sub>4</sub> laser, intracavity frequency doubling, thermal lensing effect