

文章编号: 0258-7025(2001)11-0974-03

# LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 平行平面腔激光器中的 激光输出功率凹陷\*

宋 峰 丁 欣 张 潮 波 陈 云 琳 商 美 茹 张 光 寅

(南开大学光子学中心,天津市光电子联合科学研究中心 天津 300071)

**摘要** 研究了激光二极管(LD)抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 平行平面腔激光器在不同热透镜焦距时的输出功率特性曲线。发现输出功率曲线中的凹陷现象,对它进行了分析,指出了热透镜效应和腔长对激光输出特性的复杂影响。

**关键词** 激光二极管, 固体激光器, Nd:YVO<sub>4</sub>, 热透镜效应, 输出特性

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Dips of Output Power Curve of LD Pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Plane-parallel Cavity Laser

SONG Feng DING Xin ZHANG Chao-bo CHEN Yun-lin  
SHANG Mei-ru ZHANG Guang-yin

(Photonics Center, Nankai University, Tianjin United Research  
Center on Opto-electronics, Tianjin 300071)

**Abstract** Output characteristics of laser diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> plane-parallel cavity laser at different thermal lenses are researched. The dips in the output power curves are found and analyzed. The effects of thermal lens effect and resonator lengths on the output characteristics are put forward.

**Key words** laser diode, solid-state laser, Nd:YVO<sub>4</sub>, thermal lens effect, output characteristics

### 1 引 言

LD 抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的研究和应用非常广泛,与 Nd:YAG 激光器相比,其主要缺点是热效应现象较为严重,影响了激光效率、腔的稳定性、输出光束质量等<sup>[1,2]</sup>。人们对于如何测量确定热透镜焦距进行了大量研究<sup>[2-7]</sup>,本文以 LD 抽运的两镜直腔为对象,研究了热透镜效应对输出功率的影响,发现了输出功率特性曲线中的凹陷现象,对它进行了分析。

### 2 实验与结果

图 1 为两镜直腔,用它来研究热透镜焦距对输

出功率的影响。激光介质为 3 mm×3 mm×5 mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub>, 掺杂浓度 0.5 at.-%。其一面镀 808 nm 高透和 1.064 μm 高反膜,用作全反镜,另一面镀 1.064 μm 高透膜。输出耦合镜 OC 对 1.064 μm 激光的透过率 T = 10%,它可以平移,以测量不同腔长时的激光输出特性。实验采用的半导体激光器是 Coherent 公司的 FAP 系统,经传输光纤(芯径为 800 μm)通过耦合系统从激光器的一端抽运激光晶体。抽运光的中心波长为 807.2 nm,功率在 1~16 W 之间。

实验中把 Nd:YVO<sub>4</sub> 包裹在铜块中,保持较好的热接触,固定在制冷片上进行有效的热电制冷,还采用了温控措施,在抽运功率为 1~16 W 间,温度基本维持在 15.7℃ 和 16.3℃ 之间。

测量了不同腔长下,激光输出功率随抽运功率(热透镜焦距)的变化。结果见图 2 所示。

根据实验数据,可以得到以下结果:1)在任何

\* 天津市光电子联合科学研究中心资助项目(编号 200020)及天津市自然科学基金重点项目(编号 99380111)。

收稿日期:2000-08-09;收到修改稿日期:2000-12-05

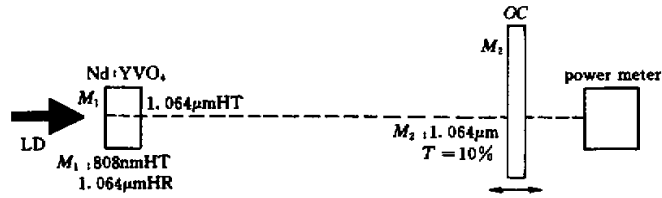


图1 实验装置示意图

Fig.1 LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> plane-parallel laser

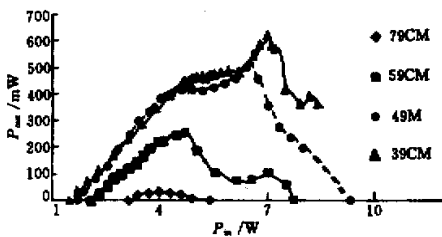


图2 不同腔长下输出功率随抽运功率(热透镜焦距)的变化曲线

Fig.2 Relationship between the output power and pump power in different cavity lengths

腔长下,刚开始时输出激光随着抽运功率的增加而增加;2)对于长腔长情况,到了一定的抽运功率,输出激光将逐渐下降,直到变为0;3)当腔长缩短,到了一定抽运功率时,输出功率下降,但随着抽运功率的增加,输出功率改变了下降的趋势,转而上升。这样,在输出曲线上出现了一个凹点;4)随着腔长进一步缩短,凹点对应的抽运功率会提高,而且在凹点后的输出功率会进一步上升,超过凹点前的输出功率,而后再逐步降到0;5)当腔长缩短到39cm以下,会出现几个凹点。

### 3 实验结果分析

Innocenzi等<sup>[3]</sup>提出了LD抽运的固体激光器中热透镜焦距的理论模型,并给出了计算公式

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

此处:

$$P_{ph} = \eta_b P_{abs}$$

$$P_{abs} = \eta_a P_{in}$$

式中,  $K_c$  为热传导率;  $w_p$  为抽运光束的光斑半径;  $P_{ph}$  为吸收的抽运功率中成为热量的功率(约为吸

收功率的20%);  $P_{abs}$  为吸收的抽运光功率;  $P_{in}$  为抽运光功率;  $\eta_{abs}$  为介质对抽运光的吸收系数;  $\eta_b$  为吸收的能量转化为热量的转化系数;  $\alpha_p$  为介质吸收系数;  $l$  为晶体长度。对掺杂浓度为0.5 at.-%的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体来说,  $K_c$  为0.054 W/cm<sup>2</sup>·K;  $\alpha_p = 14.8 \text{ cm}^{-1}$ ;  $l = 5 \text{ mm}$ ;  $dn/dT$  为热光系数,大小为  $(4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6} / \text{K}$ 。

由公式(1)可知,热透镜焦距的大小与抽运功率成反比。抽运功率越大,热焦距  $f_T$  越小。当腔长、抽运光斑(取650 μm)、激活晶体位置等确定后,热透镜焦距只跟抽运功率成一一对应关系。参见图3。该理论模型和计算公式已经被很多实验所证实<sup>[4-7]</sup>。

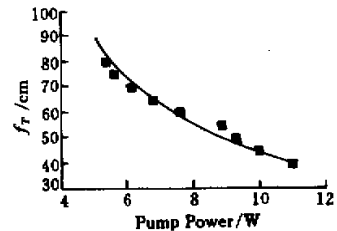


图3 不同抽运功率下的热透镜焦距

Fig.3 Theoretical curve of thermal focal lengths at different pump powers. The dots are measured by experiments

根据谐振腔理论<sup>[8]</sup>,在抽运光斑固定的情况下,当抽运功率上升时,振荡激光的基模半径将发生变化,由大变小再变大,具有U型的关系曲线,见图4(基模半径  $w_1$  是晶体入射端面的激光光斑半径)。对于短腔长,基模半径更小些,基模基本保持不变的功率范围更大些。在计算图4中的有关曲线时,我们已按图3所示的关系将抽运功率换算为热透镜的焦距值,再根据参考文献[8]中所给的关系而得出。

采用如图 1 所示的平行平面腔,第二个 U 型曲线落在基高功率处,在这里没有画出。

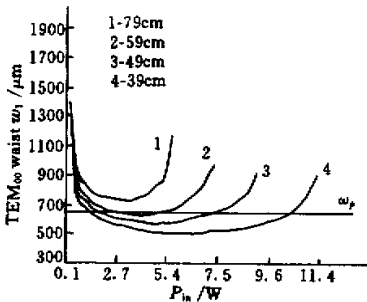


图 4 不同腔长下激光光斑与抽运功率的 U 型关系曲线关系

Fig. 4 U-type curves between pump power and fundamental waist in different cavity lengths

腔长固定为 79 cm 时,基模光斑与抽运功率的关系如图 4 中曲线 1 所示。该曲线中的所有  $w_1$  值均大于抽运光斑半径值  $w_p$  值,只是在其底部,  $w_1$  接近  $w_p$ ,因而只有在输入功率  $P_m$  为 3 W 附近,腔的衍射损耗较低,才有较弱的激光输出,见图 2 中最低的一条输出功率曲线所示。腔长固定为 59 cm 时,U 型凹陷如图 4 中的曲线 2 所示,此时,激光基模光斑半径  $w_1$  随抽运功率增大逐步减小,但其大小还是在抽运光光斑相匹配的范围内,模体积比较大。当抽运功率进一步增加时,基模半径  $w_1$  减小,当输入抽运功率在 4 W 附近时,  $w_1$  达到最小值,约 600  $\mu\text{m}$ 。在这种情况下  $\text{TEM}_{11}$  模的直径约为 840  $\mu\text{m}$ ,但抽运光斑的直径只有 650  $\mu\text{m}$ ,不利于  $\text{TEM}_{11}$  模等高阶模的产生,而只能产生基模,此时,模体积减少,而抽运光区域未变,抽运能量的利用率减少,所以输出功率下降。当抽运功率进一步增长,基模半径  $w_1$  过了最低点后将增大,输出功率又开始增大,直到进入非稳区输出功率又骤然下降。从而在输出曲线上出现了凹陷。

在腔长较短时(49 cm 或 39 cm),基模半径的最低值小(见图 4 中的曲线 3, 4),比抽运光斑半径小得多,从而会导致  $\text{TEM}_{01}$ ,  $\text{TEM}_{10}$ ,  $\text{TEM}_{11}$  模乃至更高阶模的振荡,在基模未到最小光斑时就产生了非

基模(如  $\text{TEM}_{01}$ ,  $\text{TEM}_{10}$ ,  $\text{TEM}_{11}$  模)输出,它占有较大的模体积,因而输出功率迅速上升,当基模通过最低点之后增大到一定程度,  $\text{TEM}_{00}$  模的增大又遏制了这些非基模的输出,使功率迅速下降。这是导致输出功率曲线中出现双凹一凸的原因(见图中较高的两条曲线)。

总之,由于热透镜效应的影响,有限激活孔径的限制,及  $\text{TEM}_{00}$  模和非基模间的竞争使 LD 抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光输出曲线上出现了凹陷。在凹陷附近激光有较高功率的基模输出,而且输出功率较为稳定。另外,通过谐振腔变换圆理论,可以得到:两倍凹陷(或尖峰)位置对应的抽运功率产生的热焦距大小刚好为谐振腔长,所以可以通过测量凹陷或尖峰的位置来准确测量热焦距的大小。

### 参考文献

- 1 T. Y. Fan. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, 29(6):1457~1459
- 2 J. L. Blows, T. Omatsu, J. Dawes *et al.*. Heat generation in Nd:YVO<sub>4</sub> with and without laser action. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, 10(12):1727~1729
- 3 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
- 4 B. Neuenschwander, R. Weber, H. P. Weber. Determination of the thermal lens in solid-state lasers with stable cavities. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, 31(6):1082~1087
- 5 B. Ozygus, J. Erhard. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers with transverse beat frequencies. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67(10):1361~1362
- 6 Bernd Ozygus, Qincheng Zhang. Thermal lens determination of end-pumped solid-state lasers using primary degeneration modes. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71(18):2590~2592
- 7 Justin L. Blows, Judith M. Dawes, Takashige Omatsu. Thermal lensing measurements in line-focus end-pumped neodymium yttrium aluminium garnet using holographic lateral shearing interferometry. *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(6):2901~2906
- 8 Zhang Guangyin. Dynamic analysis of solid-state laser resonators. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1991, 40(7):1065~1073 (in Chinese)