

# LD 端面泵浦 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器及其 高阶横模的工作特性 \*

李传东 胡文涛 周复正 林礼煌 徐至展

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 报道了 LD 端面泵浦 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器的实验结果, 获得了 23.6% 的光-光转换效率, 相应的斜效率为 28.8%。特别对在泵浦光与腔模匹配欠佳时高阶横模的起振特性作了比较详细的实验研究和定性讨论。

**关键词** DPL, 高阶横模, 模式匹配

## 1 引 言

激光二极管(LD)作为泵浦光源具有高效、稳定、长寿命等优点, 而其泵浦时极低的热效应又为某些激光性能良好、而热导率较低的激光晶体提供了应用的可能, 掺钕钒酸钇(Nd : YVO<sub>4</sub>)就是其中之一<sup>[1~3]</sup>。LD 端面泵浦固体激光器具有高效、横模质量好的特点, 一般用于获得 TEM<sub>00</sub> 模。对其高阶横模的工作特性的研究较少, 而了解 LD 泵浦固体激光器高阶横模的运转特性对优化半导体激光泵浦固体激光器(Diode Pumping Laser, DPL)系统的设计有重要的参考价值。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。泵浦光源为国产激光二极管阵列(Laser Diode Array, LDA), 发光截面为 280 μm × 1 μm, 发散角为 4° × 40°, 驱动电流 2A 时的输出功率为 1 W。为提高 LDA 的寿命, 使之工作在准连续状态, 重复频率为 10 Hz, 驱动 LDA 的电方波的脉冲宽度从 140 ~ 780 μs 可调。控制 LDA 的温度, 使其辐射的中心波长移至 0.808 μm, 落在 Nd : YVO<sub>4</sub> 的主吸收峰内。实验中用自制的高灵敏度能量卡计测量每一个驱动周期内的能量, 其平均功率可用“能量/电方波脉宽”而方便地换算得到。

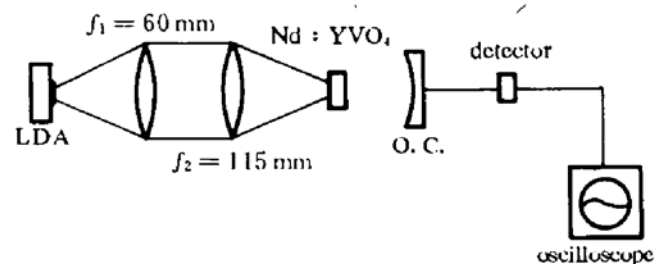


Fig. 1 Schematic of experimental setup

LDA: laser diode array; O. C.: output coupling

固体激光器采用平-凹腔, 所用晶体是福州科凤公司提供的 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体, 尺寸为 1 × 1

\* 激光技术青年科学基金资助项目。

$\times 1 \text{ mm}^3$  (*a*-cut), 掺 Nd 浓度为 2%, 相应的受激发射截面、吸收系数和上能级寿命分别为  $25.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  ( $1.06 \text{ }\mu\text{m}$ ),  $72.4 \text{ cm}^{-1}$  ( $0.81 \text{ }\mu\text{m}$ ) 和  $50 \text{ }\mu\text{s}$ 。晶体的一端作为谐振腔的输入端面, 镀有  $0.808 \text{ }\mu\text{m}$  HT/ $1.06 \text{ }\mu\text{m}$  HR 的双色膜, 另一端镀有  $1.06 \text{ }\mu\text{m}$  的增透膜, 输出腔片为凹面, 曲率半径  $R = 50 \text{ mm}$ 。

泵浦光的耦合系统用  $f_1 = 60 \text{ mm}$  和  $f_2 = 115 \text{ mm}$  的两个非球面镜组成。由于耦合系统没有对 LDA 输出泵浦光的截面进行修整, 造成在焦点处的泵浦光斑并非是很好的圆形, 仅仅是 LDA 发光面通过耦合系统之后成的像, 而且存在着较大的像散, 导致耦合系数较低。利用几何光学成像原理, 估算焦点处的光斑尺寸为  $480 \text{ }\mu\text{m} \times 1.7 \text{ }\mu\text{m}$ , 发散角为  $2.24^\circ \times 22.4^\circ$ 。为确定 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体吸收的泵浦功率, 用直径约为  $0.8 \text{ mm}$  的光阑在焦点处截取聚焦的光斑, 测得耦合系统的耦合系数只有 40%。为对 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的激光性质有比较清楚的认识, 在实验的数据处理中用实际聚焦的功率作为输入功率。

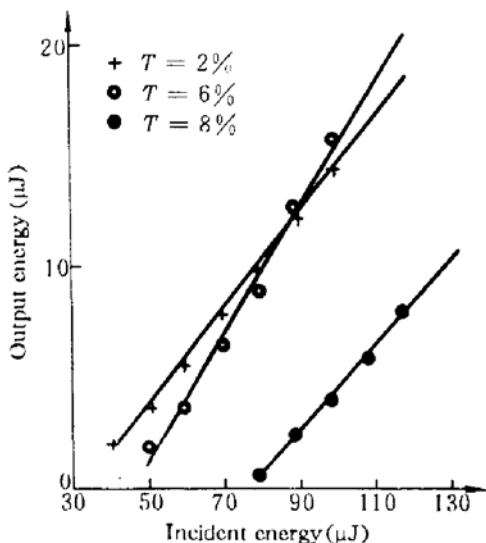


Fig. 2 Output energy versus incident energy for a Nd:YVO<sub>4</sub> crystal laser. The output coupling is 2%, 6% and 8% at  $1.06 \text{ }\mu\text{m}$  respectively

### 3 实验结果及讨论

实验中用的三种输出腔片对  $1.06 \text{ }\mu\text{m}$  波长的透过率分别为 2%, 6%, 8%, 调整谐振腔使泵浦光横模与腔模较好匹配。图 2 分别给出了这三种腔片对应的输入-输出曲线, 其中用每个脉冲的入射能量(功率  $\times 400 \text{ }\mu\text{s}$ )作横坐标。 $T = 2\%$ ,  $6\%$ ,  $8\%$  时的泵浦阈值平均功率  $P_{th}$  分别是  $34 \text{ mW}$ ,  $90 \text{ mW}$ ,  $178 \text{ mW}$ 。在  $T = 6\%$  时测得的斜效率为 28.8%, 驱动电流  $2 \text{ A}$  时, 每个驱动周期的输入、输出能量分别为  $153.78 \text{ }\mu\text{J}$  和  $36.3 \text{ }\mu\text{J}$ , 对应的平均功率分别为  $384.5 \text{ mW}$  和  $90.8 \text{ mW}$ , 光-光转换为 23.6%。由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 是各向异性晶体, 其输出激光

是线偏振光, 偏振方向为  $\pi$  方向。

为估算泵浦光与腔模的匹配程度, 利用 LD 泵浦固体激光器的斜效率公式<sup>[4]</sup>

$$\eta_s = (T/L)(\lambda_p/\lambda)(A/A_p)\eta_a$$

其中  $L$  为谐振腔的双程损耗,  $T$  为输出镜的透过率,  $\lambda_p$  和  $\lambda$  分别为泵浦光和信号光的波长,  $A$ ,  $A_p$  是腔模和泵浦光的横截面积,  $\eta_a$  为吸收效率。实验中的主要损耗来自晶体的内损耗和腔镜的透过率, 晶体的内损耗为  $0.2\%$  ( $0.02 \text{ cm}^{-1}$ )。将数据代入算得  $A/A_p = 0.39$ , 可见有相当一部分的泵浦光没有对激光的形成起作用。实验中三种透过率其最大输出时的腔长都在  $4.2 \text{ mm}$  左右, 按腔模理论计算得腔基模在晶体上的腰斑半径  $\omega_0$  约为  $67.8 \text{ }\mu\text{m}$ 。可用公式<sup>[5]</sup>

$$\omega_p(z) = \omega_0 + \theta|z|$$

来估算泵浦光斑的半径, 其中  $\omega_p(z)$  是在距泵浦光束腰为  $z$  处的泵浦光斑半径,  $\omega_0$  为束腰半径,  $\theta$  为发散角。当泵浦光斑在垂直 LDA 结平面方向上的半径为  $67.8 \text{ }\mu\text{m}$  时, 将前面算得的光斑尺寸及发散角代入, 可算得在平行结平面方向上的泵浦光斑半径为  $246.7 \text{ }\mu\text{m}$ 。很明显, 本实验中的耦合系统对获得 TEM<sub>00</sub> 模的激光输出效果不佳, 实验也表明最大激光输出并非 TEM<sub>00</sub> 模。

在调整过程中发现,示波器显示的激光输出波形有时会出现如图 3 所示的情况。谐振腔在经过一段时间的弛豫振荡之后,并不是形成稳定的激光输出,而是又出现了另一个有一定延迟时间的弛豫振荡,然后再逐渐稳定,有时在第二个弛豫振荡之后还会出现第三个,而且后继弛豫振荡的延迟时间有较大的抖动。在图 3(a), (b) 中显示了几个驱动周期叠加的输出波形,从中可以看到后继振荡及其在延迟时间上的抖动。图 3(c) 为在示波器的输入端并联上一个电阻时获得的此时激光输出波形的细节,很明显,图 3(a), (b) 中的拐点对应着后继的弛豫振荡。

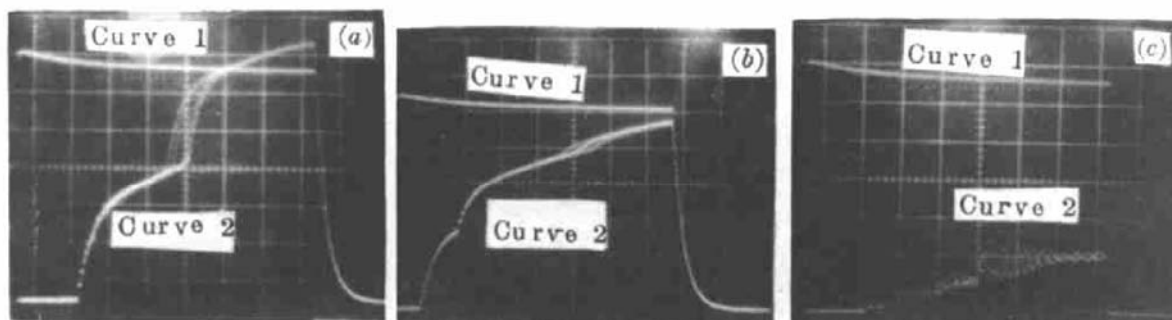


Fig. 3 Laser waveforms of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal. Time scale: 100  $\mu$ s/div

Curve 1: waveforms of the driving current, the amplitude scale is 0.2 V/div, corresponding to 200 mA/div

Curve 2: waveforms of the Nd:YVO<sub>4</sub> output, the amplitude scale is 0.5 V/div (a), (b), and 5 mV/div (c)

进一步的实验表明,泵浦光强度的改变对后继振荡有影响,而且 TEM<sub>00</sub> 模和高阶横模对这种改变的反应很不相同。对 TEM<sub>00</sub> 模,第二个弛豫振荡对泵浦光强的变化很敏感,LDA 的驱动电流降到一定程度时第二个弛豫振荡消失,输出波形变得平滑。而对高阶横模,随着泵浦光强的降低,第二个与第一个弛豫振荡的强度比值几乎没有变化,前者没有一个明显的产生阈值。

我们认为产生这种现象的原因可能在于泵浦光截面没有很好地圆化,因横模的空间烧孔效应而造成的基模和高阶横模起振时间的差异。实验中用直径约为 0.8 mm 的光阑截取 Nd:YVO<sub>4</sub> 输出激光的不同部分,以确定后继振荡与输出激光横截面上光场分布的关系。

对 TEM<sub>00</sub> 模,发现当光阑通光孔正对基模中心时,后继振荡的幅度在整个输出波形中比例明显下降,驱动电流加到很大时,在第一个弛豫振荡之后仍然能保持一个平稳的输出。将通光孔移到基模的两侧,调整通光孔的位置,可以发现后继振荡变得非常明显,其延迟时间有非常大的起伏,而且驱动电流的变化对它的影响也非常显著。在实验中, $I < 1.24$  A 时没有后继的弛豫振荡,谐振腔在经过第一个弛豫振荡之后形成稳定的激光输出。之后随着驱动电流的增大,后继振荡相对于第一个弛豫振荡的延迟时间逐渐缩短。 $I = 1.28$  A 时出现另一个延迟时间比较稳定的弛豫振荡[图 3(c)],位于前两个弛豫振荡之间,其延迟时间随泵浦光强的增加而减小。用上转换片检查此时 1.06  $\mu$ m 激光,发现在原基模的两边出现了高阶横模,后继的弛豫振荡即对应着这些新出现的高阶横模。

由于泵浦光截面是狭长形的,在较低泵浦光强度下,虽可以通过调整谐振腔抑制高阶模而获得 TEM<sub>00</sub> 模的激光输出,但随着泵浦光强度的提高,高阶模也达到阈值而起振。起先由于泵浦光的超阈值不高,高阶横模起振时间有较大的抖动;当泵浦光的超阈值增大到一定的程度,高阶横模可以稳定起振,实验中  $I = 1.28$  A 时出现的第三个弛豫振荡就对应着这种情况。

对 TEM<sub>10</sub> 模,当将通光孔对准两个较强光斑之一时,激光输出波形与 TEM<sub>00</sub> 中将通光孔对准基模时相同。而将孔对准两个光斑之间的暗线时,输出波形的起伏变得非常明显,其随泵



浦光强度的变化也不同于  $TEM_{00}$  模, 后继振荡没有明显的产生阈值。从起伏产生的位置看,  $TEM_{10}$  模的起伏对应着腔基模, 其产生阈值较低, 几乎是随着激光的形成而产生, 所以在实验中看不出明显的阈值。泵浦光较强时  $TEM_{10}$  模首先起振, 当谐振腔内形成稳定的  $TEM_{10}$  后, 由于激光场强度的不均匀分布<sup>[6]</sup>, 造成 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体内反转粒子数的不均匀分布, 在中心位置由于激光场较弱, 反转粒子数密度较高, 有可能又形成  $TEM_{00}$  模的激光场, 出现后继的弛豫振荡。在  $TEM_{10}$  模的形成过程中, 光场的随机起伏使中心位置保存的反转粒子数密度有一定的随机性, 因此后继弛豫振荡的延迟时间也有一定的起伏。

## 4 结 论

在本实验中, 由于泵浦光束在增益介质中没有很好的圆化, 腔内激光模形成后造成反转粒子数在横向上的空间烧孔。对 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体, 它的受激发射截面较大, 未被消耗掉的反转粒子数较容易形成新的激光横模输出, 后继弛豫振荡在时间上有一个延迟。延迟时间与泵浦光的强度及其在激光增益介质内的场分布有关, 当泵浦光与腔模匹配较好时, 后继振荡消失。因此上述实验结果在一定程度上可以帮助我们判断腔模与泵浦光束的匹配程度。对准连续运转的 DPL, 上述横模起振时间上的差异对提高系统的效率和稳定性都有较大的影响。另外, 虽然本实验是端面泵浦的, 但泵浦光场在晶体中的分布与侧面泵浦有一定的相似之处, 所以我们相信实验结果对侧面泵浦的 DPL 也有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 G. Feugnet, M. Schwarz, C. Larat *et. al.*.  $TEM_{00}$  surface-emitting laser-diode longitudinally pumped Nd : YVO<sub>4</sub> laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(24) : 2114
- 2 H. Plaessmann, K. S. Yamada, C. E. Rich *et. al.*. Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acousto-optically *Q*-switched solid-state laser. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(33) : 6616
- 3 T. Sasaki, T. Kojima, A. Yokotani *et. al.*. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd : YVO<sub>4</sub> microchip laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(21) : 1665
- 4 S. Basu, R. L. Byer. Continuous-wave mode-locked Nd : glass laser pumped by a laser diode. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(6) : 458
- 5 T. Y. Fan, A. Sanchez. Pump source requirements for end-pumped laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1990, **QE-26**(2) : 311
- 6 周炳琨. 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1984. 57~67

## A LD End-pumped Nd : YVO<sub>4</sub> Laser and Its High-order Transverse Mode Performance

Li Chuandong Hu Wentao Zhou Fuzheng Lin Lihuang Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** In this paper, the experimental results of a Nd : YVO<sub>4</sub> laser longitudinally pumped by LDA are reported. The optical to optical efficiency and slop efficiency are 23.6% and 28.8% respectively at 6% output coupling. The starting performing characteristics of high-order transverse mode are investigated experimentally and analysed qualitatively.

**Key words** DPL, high-order transversal mode, mode matching