

# 激光二极管阵列侧面泵浦 Nd : YLF 激光器\*

胡文涛 周复正 陈有明 姜中宏

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 报道准连续 60 W 激光二极管阵列侧面泵浦 Nd : YLF 固体激光器的研究结果, 当器件的运转重复频率为 30 Hz 时, 得到 4.4 mJ 的 1.047  $\mu\text{m}$  激光输出, 光-光转换效率达到 18.3 %, 斜率效率达 24.4 %。声光和电光调 Q, 得到能量为 2.2 mJ, 脉宽分别为 50 ns 和 30 ns 的脉冲输出。探讨了静态输出的最佳耦合透过问题, 将该器件的一些参数与 Nd : YAG 进行了比较, 指出了差别的成因。

**关键词** 激光二极管泵浦, Nd : YLF 激光, 调 Q。

## 1 引 言

激光二极管阵列泵浦掺 Nd 固体激光材料产生了高效且长寿命的激光。据报导, 就 Nd : YAG 激光器而言, 迄今已获得大于 50% 的光学斜效率和大于 15% 的插头电光效率<sup>[1]</sup>。与研究最为广泛的 Nd : YAG 相比, Nd : YLF 作为二极管泵浦的材料有许多优越性, 其长达 480  $\mu\text{s}$  的激光上能级寿命使之能用较少的激光二极管泵浦而获得相同的存储能量。在低能量输出范围, 当吸收效率和损耗都相同时, Nd : YLF 将比 Nd : YAG 具有更高的光学斜效率, 这是由于 Nd : YLF 的上能级寿命与受激光受发射截面的乘积比 Nd : YAG 大, 从而使其阈值低于后者。在高能输出范围, 其中等增益的跃迁(1.053  $\mu\text{m}$ ,  $\sigma$  偏振)允许利用更高亮度的二极管泵浦源, 从而能在放大自发辐射发生之前存储更多的能量, 而这一波长正好与用于大功率激光系统放大器的 Nd : glass 的激光波长相吻合, 因而可作为注入种子光源。另外, Nd : YLF 晶体所具有的自然双折射可在很大程度上削弱热致双折射效应。Nd : YLF 是单轴晶,  $\pi$  偏振的激射波长为 1.047  $\mu\text{m}$ , 截面为  $3.7 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ ,  $\sigma$  偏振的激射波长为 1.053  $\mu\text{m}$ , 截面为  $2.1 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 。由于 Nd : YLF 的优良特性, 国际上已有不少有关 LD(LDA)泵浦 Nd : YLF 的研究报道<sup>[2,3]</sup>。作者曾报道过端面泵浦的 Nd : YLF 固体激光输出<sup>[4]</sup>, 本文报道侧面泵浦的研究结果。

## 2 实 验

Nd : YLF 晶体\*\*是沿  $a$  轴切割的长方棒, 截面为  $2 \times 2 \text{mm}^2$ , 长度为 13 mm。 $a$  轴棒的激

\* 中国科学院军工“八五”重点课题资助; \*\* Nd : YLF 由电子部华北光电所提供。

收稿日期: 1994 年 7 月 8 日; 收到修改稿日期: 1994 年 8 月 24 日

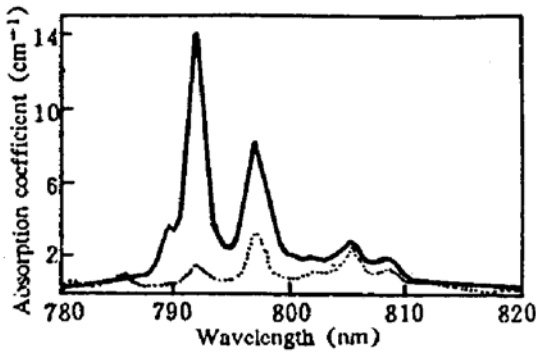


Fig. 1 Absorption spectra of Nd:YLF at diode laser wavelength. —  $\pi$  polarization, ...  $\sigma$  polarization

光偏振态可以是 $\pi$ 偏振(沿 $c$ 轴),也可以呈 $\sigma$ 偏振(垂直 $c$ 轴),但由于 $\pi$ 偏振的增益截面较大,因此在无选模无件时总是 $1.047\ \mu\text{m}$ 激光优先起振。该晶体的 $\text{Nd}^{3+}$ 离子的掺杂浓度为 $1.0\ \text{at}\%$ ,在室温下的吸收谱如图1所示,图中虚实两条线分别对应两种偏振态。在 $780\sim 810\ \text{nm}$ 波段,吸收主峰在 $\pi$ 偏振的 $792\ \text{nm}$ 处,次峰在 $\pi$ 偏振的 $796\ \text{nm}$ 处,然后是 $\sigma$ 偏振在该波长的吸收,其吸收系数为 $3\ \text{cm}^{-1}$ 。泵浦源为SDL公司出品的准连续 $60\ \text{W}$ 激光二极管阵列(SDL-3230-TZ),它的阈值电流为 $16.7\ \text{A}$ ,斜率效率为 $1.11\ \text{W/A}$ ,发光区尺寸为 $10\ \text{mm}\times 1\ \mu\text{m}$ ,发射的激光沿 $10\ \text{mm}$ 方向

具有明显的偏振特性,因此实验所用晶体为 $\sigma$ 偏振吸收。激光二极管阵列的标称中心波长为 $799\ \text{nm}$ ,谱宽为 $3.1\ \text{nm}$ ,测试条件为重复率 $100\ \text{Hz}$ ,脉宽 $200\ \mu\text{s}$ ,室温 $25^\circ\text{C}$ 。实验中通过对激光二极管阵列的工作条件的控制,使中心波长移近 $796\ \text{nm}$ 。激光二极管阵列安装在一只用紫铜做的支座上,并靠该支座自然散热,因此激光二极管阵列的结温只能通过重复频率、工作电流和脉宽结合室温来控制。实验中激光二极管阵列的一些固定工作参数为:室温 $12^\circ\text{C}$ ,脉宽 $400\ \mu\text{s}$ ,功率为激光二极管阵列满负荷,此时只有重复频率是可变的。

YLF晶体的两个侧表面经过精抛光,一个面调整到与激光二极管阵列尽可能接近但又要防止挤伤激光二极管阵列,这可通过机械系统的设计初步得到保证,与激光二极管阵列相对的一面紧贴一块反射镜,它对 $800\ \text{nm}$ 附近的泵浦光几乎全反,这使得YLF对泵浦光具有双程吸收,即有效吸收长度为厚度的两倍,达到 $4\ \text{mm}$ ,考虑到泵浦光的谱宽有 $3.1\ \text{nm}$ ,估计被吸收的泵浦光占 $55\%$ ,这样的吸收效率是较低的,同样掺杂同样厚度的YAG晶体,吸收效率可达 $85\%$ 以上。从吸收率的角度看,用激光二极管阵列侧面泵浦 $c$ 轴YLF薄板条,由于吸收效率可达 $95\%$ 以上,估计总体效率也不会差。

晶体的两个端面均为平面,其中一面镀有 $1.053\ \mu\text{m}$ 的全反膜作为谐振腔的高反镜,另一端则镀 $1.053\ \mu\text{m}$ 的增透膜。输出镜与晶体的距离约为 $50\ \text{mm}$ ,其输出透过率和曲率半径是实验中可选择变换的参数。实验选取了一组平面输出镜和一组凹面输出镜,实验结果如表1所列。从表中可以看到,对于平面镜输出情形,在 $10\ \text{Hz}$ , $30\ \text{Hz}$ , $50\ \text{Hz}$ 几档工作频率中,以中间值 $30\ \text{Hz}$ 为最佳,这一结论与透过率无关;至于输出能量与透过率的关系,在 $T$ 取值于 $9.5\%$ 到 $16\%$ 之间时,最大输出能量随 $T$ 的增大而减少,但 $T$ 的进一步减小是否会继续导致输出能量的增加呢?这个问题通过凹面输出镜的实验结果得到了解答,看到:当 $T=6\%$ 时,输出能量已明显小于 $T=9.5\%$ 的情形,由此可见, $9.5\%$ 的输出透过率已接近最佳值。至于输出能量与工作频率的关系,其趋势和平面镜情形一样。

比较不同曲率输出镜的结果发现:用平面输出镜能获得较大的输出能量,当 $T=9.5\%$ ,重复频率为 $30\ \text{Hz}$ 时,获得本器件的最大静态输出 $4.4\ \text{mJ}$ ,相应的光-光转换效率为 $18.3\%$ 。这一输出水平略低于相同泵浦条件下的Nd:YAG激光器,主要是YLF的 $\sigma$ 偏振吸收效率太。平面镜输出能量大的主要原因是泵浦光和腔模的重叠程度高。激光输出模式为高阶横模。

Table 1 Nd : YLF laser output energy vs the repetition rate and the transmission of output coupler

HzT	r=∞			r=200 mm	
	9.5%	12%	16%	6%	9.5%
10 Hz	3.7	2.6	1.7	2.8	3.2
30 Hz	4.4	3.1	2.0	3.3	4.2
50 Hz	3.2	2.2	1.4	2.4	2.8

图 2 为平面镜下三种透过率对应的阈值泵浦能量，横坐标是输出镜反射率的自然对数的相反数，对三个数据点作线性模拟所得的方程为： $Y = 48.1447X + 1.5186$ ，而 Findly-Clay 法则<sup>[5]</sup>所对应的阈值能量  $E_{th}$  和  $\ln(1/R)$  之间的关系为：

$$E_{th} = E_{th0} + E_{th0} \times \ln(1/R) / \delta$$

其中， $E_{th0}$  是输出透射为零时的阈值， $\delta$  是谐振腔的内损耗，从以上两式可得， $\delta = 3.1\%$ 。该值比 Zig-Zag 结构的 Nd : YAG 要小得多；对于后者，一般为  $6\% \sim 10\%$ <sup>[6]</sup>。因此 Zig-Zag 的 Nd : YAG 器件获得最大输出能量所需的透过率要大得多，这一点也已在以往的实验中得到了验证。<sup>[7]</sup>

在静态器件的基础上分别进行了声光和电光调 Q 实验。声光调制器用 SF<sub>6</sub> 玻璃作介质，用 Y46° 切向的 LiNbO<sub>3</sub> 作换能器，插入损耗在 5% 以内。调制频率为 80 MHz，当声光驱动功率为 3 W 时，调制深度可达 34%。当空腔静态输出达 4.4 mJ 时，插入声光调制器一般较易得到大于 4.2 mJ 的输出，射频驱动加到 3 W 左右时，完全抑制了自由振荡，将激光二极管阵列驱动器输出的触发信号输出到射频驱动源，调整延迟时间，得到最大脉冲能量为 2.2 mJ，脉宽为 50 ns，波形抖动小于 1%。

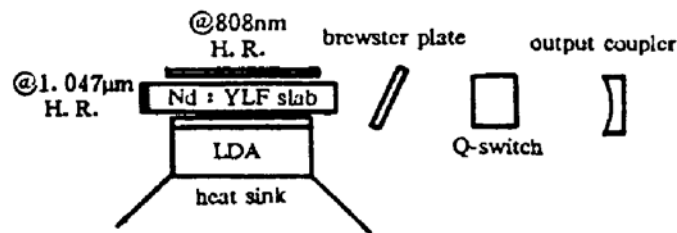


Fig. 3 Schematic of the laser-diode-array side-pumped electro-optic Q-switched Nd : YLF laser

在电光调 Q 实验中，所用的普克尔盒是由响应快、损耗小的 KD\*P 晶体制作的，当 KD\*P 插入时，静态输出由原来的 4.4 mJ 下降至 3.4 mJ。由于普克尔盒不含起偏和检偏元件，加上高压后腔内本征模式的变化引起一定的损耗，但还不足以完全抑制自由振荡，为此可在腔内置入一块石英薄片，放置角度为布儒斯特角，并使 p 偏振方向与  $\pi$  偏振一致，由此引入的损耗几乎可以忽略。给 KD\*P 加四分之一波电压 (3500 V)，这样腔内光束两次经过它时，线偏振方向转过 90°，即 p 偏振变为 s 偏振，从而在布儒斯特窗上产生大于 30% 的双程损耗，抑制住自由振荡。加上触发信号并调好延时，得到最大脉冲输出能量为 2.2 mJ，脉宽为 30 ns。实验装置如图 3 所示。

### 3 分析与讨论

作者曾在激光二极管阵列泵浦的 Nd : YAG 的 Zig-Zag 板条激光器中获得同样能量但脉

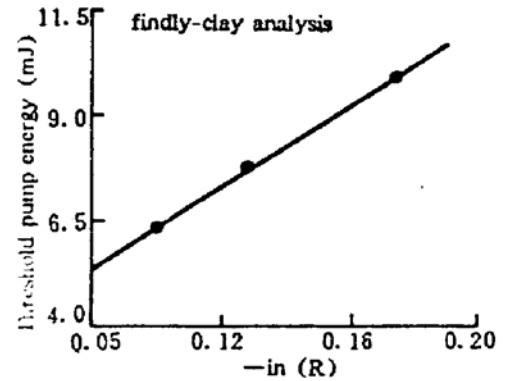


Fig. 2 Extrapolated thresholds at a variety of mirror reflectivities

宽较短的脉冲,在那里声光调 Q 的脉宽为 20 ns,而电光则更短至 16 ns。两者在脉宽上的差别主要是由介质结构的不同引起的。对直方棒情形,由于介质吸收的指数特性,使得增益在截面上的分布不均匀,这种不均匀性使脉冲被展宽。而 Zig-Zag 结构中,光线在介质中有四次内全反射,这极大地削弱了增益不均匀性,从而使脉冲特性得到优化。就光线直接穿过增益介质的结构而言,若将直方棒改成圆棒,并用铝铂或银铂包裹侧表面,仅留出一条供泵浦耦合用的狭缝,形成一种“黑洞”式结构,以增加吸收效率并使增益均匀化,也非常有利于脉冲特性改善。

### 参 考 文 献

- [1] R. Scheps, J. F. Myers, Efficient, scalable internally folded Nd : YAG laser end-pumped by laser diodes. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, QE-29(6) : 1515~1519
- [2] C. F. Rac, J. A. C. Terry, B. D. Sinclair *et al.*, Single-frequency, end-pumped Nd : YLF laser excited by a 12 mJ diode-laser array. *Opt. Lett.*, 1992, 17(23) : 1673~1675
- [3] Th. Graf, J. E. Balmer, High-power Nd : YLF laser end pumped by a diode-laser bar. *Opt. Lett.*, 1993, 18(16) : 1317~1319
- [4] 马建伟,周复正,朱又三等, MQW-LDA 泵浦 Nd : YLF 激光器调 Q 的动力学过程和双机制作用。光学学报, 1993, 13(3) : 193~198
- [5] D. Findly, R. A. Clay, The measurement of internal losses in 4-level lasers. *Phys. Lett.*, 1966, 20(3) : 277~278
- [6] M. K. Reed, N. J. Kozlovsky, R. L. Byer, Diode-laser-array-pumped neodymium slab oscillators. *Opt. Lett.*, 1988, 13(3) : 204
- [7] Zhou Fuzheng, Chen Youmoing, Hu Wenato *et al.*, 110 kW kilowatt Q-switched pulse diode pumped Nd : YAG slab laser. *Chinese J. Lasers*, 1994, B3(1) : 27~28

## Diode-Laser-Array Side-Pumped Nd : YLF Laser

Hu Wentao      Zhou Fuzheng      Chen Youming      Jiang Zhonghong

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

(Received 8 July 1994; revised 24 August 1994)

**Abstract** We report study on a Nd : YLF laser side-pumped by a quasi CW 60 W laser-diode-array. The laser provided 4.4 mJ output energy at 1.047  $\mu\text{m}$  with repetition rate of 30 Hz. Which gives an optical efficiency of 18.3% and slope efficiency of 24.4%. On acousto-optic and electro-optic Q-switched operation, pulse energy of 2.2 mJ was obtained with pulse widths of 50 ns and 30 ns respectively. The optimal output transmission at free running was revealed in experiments. Some parameters were compared with those of Nd : YAG lasers.

**Key words** diode-laser-array, side-pumping, Nd : YLF lasers, Q-switching.