

# LD 泵浦 Nd:YAG 激光器的连续激光输出 和高重复率调 Q

胡文涛 周复正 陈有明 沈小华 姜中宏

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 用连续输出 1 W 国产多量子阱激光二极管阵列(MQW-LDA)泵浦 Nd:YAG 固体激光器, 连续激光输出最大功率为 112 mW, 光-光效率为 10.6%, 斜效率为 20%. 实现了连续泵浦高重复频率(1 kHz, 4 kHz, 10 kHz)调 Q 输出, 最大峰值功率为 355 W, 最大平均功率为 43.7 mW.

**关键词** 半导体激光泵浦, 高重复频率调 Q.

## 1 引 言

半导体激光泵浦的固体激光器(DPL)兼有了半导体激光和固体激光的双重优点, 因此倍受关注, 近年来在国际上得到迅猛发展. 连续泵浦高重复频率调 Q 与脉冲泵浦的 DPL 器件相比, 具有多方面的优越性, 比如: 具有高重复频率, 高平均功率和高全光-光效率等. DPL 的调 Q 器件在激光雷达、激光测距和光电对抗等方面的应用中都显现了较大的优越性. 声光 Q 开关属于慢开关, 但在小功率半导体激光二极管泵浦的固体激光器中, 由于峰值反转粒子数超阈度不高, 脉冲的发展时间约比脉宽大一个量级, 一般为几百纳秒, 这比 Q 开关的开启时间长, 因此 Q 开关的速度对脉冲的特性无太大影响; 另外, 由于声光 Q 开关的腔内插入损耗小(小于 1%), 所以声光开关适合做 DPL 的调 Q 器件.

国际上已报道 DPL 声光调 Q 输出的平均功率达 1.6 W(20 ns, 160  $\mu$ J, 10 kHz)<sup>[1]</sup>, 脉冲峰值功率达 500 kW(4 mJ, 8 ns)<sup>[2]</sup>. 作者曾实现国产 200 mW MQW-LDA 泵浦 Nd:YLF 固体激光器的准连续(100 Hz)调 Q, 得到 1  $\mu$ J, 70 ns 的单脉冲<sup>[3]</sup>, 还实现了 NYAB 自倍频激光器的连续泵浦调 Q, 在泵浦功率为 500 mW, 重复率为 10 kHz 时, 得到平均功率为 6 mW 的绿光输出<sup>[4]</sup>. 本文报道用连续输出达 1 W 的国产多量子阱激光二极管泵浦 Nd:YAG 固体激光器的连续激光输出和连续泵浦高重复频率调 Q 的实验结果和理论分析结果.

## 2 DPL 的结构和实验结果

DPL 声光调 Q 的实验装置如图 1 所示. 多量子阱线列阵器件的总发光面尺寸为 280  $\mu$ m  $\times$  1  $\mu$ m, 半导体热电堆将温度控制在 18°C, MQW-LDA 在连续工作时的辐射中心波长为 808

nm, 正好落在 Nd:YAG 在主吸收峰上. 声光调制器的声光介质为 ZF6 玻璃, 它的衍射效率大约是熔石英 4 倍; 声光作用长度为 17 mm, 有效作用口径为 500  $\mu\text{m}$ , 两端镀 1.06  $\mu\text{m}$  的高增透膜, 插入损耗约为 0.6%; 压电换能器为 Y36°

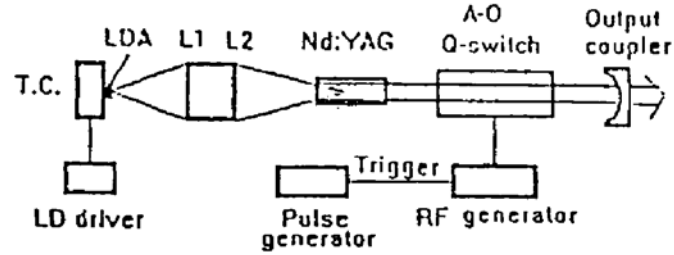


Fig. 1 Schematic diagram of A-O Q-switched laser

切向的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体, 超声频率为 80 MHz, 当驱动功率为 2 W 时, 一级衍射效率达 15%. 增益介质(Nd:YAG)棒的尺寸为  $\phi 5 \times 5$  mm, Nd 的掺杂浓度为 1. at%, 棒的两端均为平面, 输入端对 1.06  $\mu\text{m}$  波长的反射率为 99.8%, 对 808 nm 透射率为 90%; 另一端对 1.06  $\mu\text{m}$  透射率为 99.8%. 输出镜的透射率取 2% (曲率半径为 50 mm) 和 6% (曲率半径为 200 mm) 两种.

## 2.1 连续激光输出

在实验装置中未加入声光调制器前, 先进行了连续激光输出实验. 实验中采用了透射率为 2% 和 6% 的两种输出镜, 输出镜到增益介质近端面的距离为 10 mm, 对应两种输出镜, 器件的泵浦阈值分别为 88 mW 和 214 mW; 当泵浦功率达到最大值 1058 mW 时, 得到固体激光最大输出功率分别为 40 mW 和 112.6 mW, 全光-光效率分别为 3.78% 和 10.6%, 在泵浦功率较大的区域, 斜效率分别为 6.25% 和 19.38%. 实验观察到, 输出镜的透过率为 6% 时的最大输出功率和斜效率都将近是透过率为 2% 时的 3 倍. 器件连续输出功率随泵浦功率的变化关系如图 2 所示. 图中两条曲线都不是理想的直线, 这是因为在阈值附近是基横模振荡, 泵浦光利用率较低, 斜效率较小, 而泵浦功率增大时出现低阶横模振荡, 使斜效率提高.

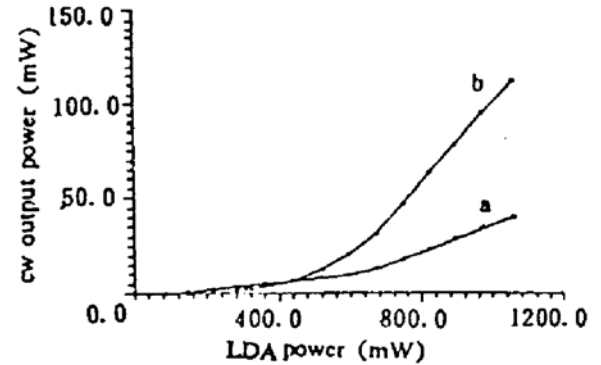


Fig. 2 Continuous wave output power as a function of the LDA power. The transmission of the output mirror is 2% and 6% respectively corresponding to a and b

## 2.2 调 Q 实验

### 2.2.1 用 2% 的腔镜耦合输出

进行了连续泵浦下, 重复频率分别为 1 kHz, 4kHz, 10 kHz 的调 Q 实验, 激光器在调 Q 工作方式下的平均输出功率随泵浦光功率的变化曲线如图 3 所示. 当泵浦功率达到最大值 1058 mW 时, 在各重复频率下获得的调 Q 脉冲的参数如表 1 所列. 表中“稳定度”指的是: 在示波器上长时间观察, 脉冲峰值的相对变动.

Table 1. Experimental results of Q-switched laser's parameters at various of pulse repetition rates with  $T = 2\%$

repetition rate (kHz)	pulse width (ns)	peak power (W)	pulse energy ( $\mu\text{J}$ )	average power (mW)	intensity fluctuation
1	50	160.0	8.0	8	$\pm 2.5\%$
4	55	100.0	5.5	22	$\pm 5.0\%$
10	70	42.8	3.0	30	$\pm 5.0\%$

### 2.2.2 用 6% 的腔镜耦合输出

输出镜的透过率换成 6% 后, 同样进行了连续泵浦下, 重复频率为 1 kHz, 4 kHz, 10 kHz 的调 Q 实验, 激光器脉冲输出的平均功率随泵浦光功率的变化关系如图 4 所示. 当泵浦功率达到最大值 1058 mW 时, 在各重复频率下获得的调 Q 脉冲参数如表 2 所列. 分析表 1, 表 2 的各项数据, 可以得到以下结论: 重复频率为 10 kHz 以内时, 随着频率的增大, 脉冲输出的平均功率增大, 单脉冲能量减小, 脉宽增大, 峰值功率下降; 对于某一固定的频率,  $T=6\%$  时, 峰值功率高, 脉宽窄, 平均功率大, 亦即用 6% 的透过率比用 2% 的透过率效果更佳.

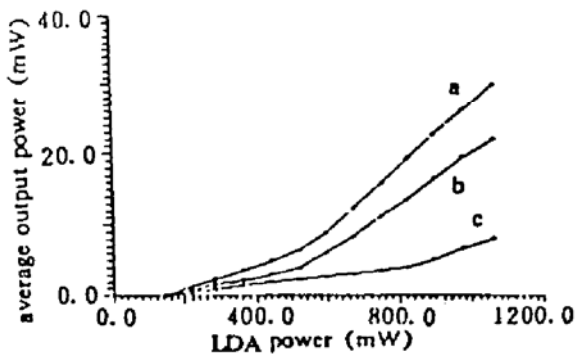


Fig. 3 Average output power of the Q-switched laser as a function of the LDA power. The transmission of the output mirror was 2%, the pulse repetition rates were 10 kHz, 4 kHz, and 1 kHz respectively corresponding to a, b, and c

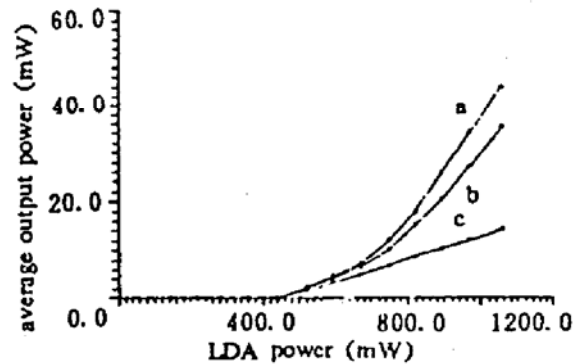


Fig. 4 Average output power of the Q-switched laser as a function of the LDA power. The transmission of the output mirror was 6%, the pulse repetition rates were 10 kHz, 4 kHz, and 1 kHz respectively corresponding to a, b, and c

Table 2. Experimental results of Q-switched laser's parameters at various of pulse repetition rates with  $T = 6\%$

repetition rate (kHz)	pulse width (ns)	peak power (W)	pulse energy ( $\mu\text{J}$ )	average power (mW)	intensity fluctuation
1	40	355.0	14.2	14.2	$\pm 2.5\%$
4	50	176.0	8.8	35.2	$\pm 5.0\%$
10	65	67.0	4.4	43.7	$\pm 7.0\%$

图 5 所示为实验记录的重复率为 1 kHz 时的脉冲波形, 其中 a 是单脉冲波形, b 是 1000 个脉冲叠加的波形, c 是泵浦功率下降到 500 mW 时 250 个脉冲叠加的波形(脉宽为 80 ns, 稳定度优于  $\pm 1\%$ ).

为了考察高重复率调 Q 激光输出的平均功率的极大值, 进行了 DPL 调 Q 器件的动静比测试. 实验是在准连续条件下进行的, 泵浦光脉宽为 400  $\mu\text{s}$ , 重复率为 10 Hz, 用高灵敏度能量计分别测试了静态(不调 Q)和动态(调 Q)的能量, 在静态下, 泵浦光峰值功率为 1058 mW 时, 泵浦时间超过 100  $\mu\text{s}$  后出现弛豫振荡, 能量计将一个周期内的弛豫振荡能量积分, 得到总能量为 17  $\mu\text{J}$ , 换成调 Q 工作时, Q 脉冲宽度为 40 ns, 能量集中在瞬间释放, 能量计对此快速响应, 测得脉能为 14.4  $\mu\text{J}$ , 由此可确定动静比为 84.7%. 根据动静比, 估计高重复率调 Q 时, 输出平均功率的极大值. 当  $T = 6\%$  时, 连续激光输出功率为 57 mW, 调 Q 输出平均功率的极大值约为 48.3 mW, 由此可见当重复频率为 10 kHz 时, 平均功率(43.7 mW)已接近极大值; 当  $T = 2\%$  时, 连续激光输出功率为 40 mW, 调 Q 输出平均功率的极大值约为

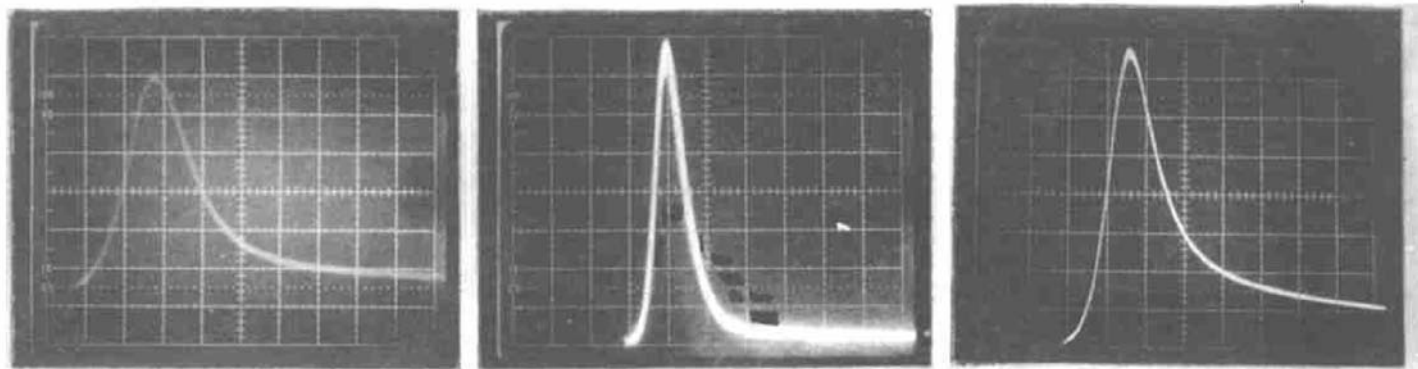


Fig. 5 Temporal waveform profile of Q-switched Nd:YAG laser. a, Single laser pulse (20 ns/div); b, Record accumulation of 1000 shots (higher pumping power, 50 ns/div); c, Record accumulation of 250 shots (lower pumping power, 50 ns/div)

33.8 mW, 因此当重复频率为 10 kHz 时, 平均功率(30 mW)也较接近极大值.

**结 论** 1) 国产 CW 1 W MQW-LDA 泵浦 Nd:YAG, 使用两块非球面镜组成的简单耦合系统得到 20% 的斜效率, 连续输出的最大功率达 112 mW, 光-光效率为 10.6%.

2) 实验得到了不同输出透过率和各种重复频率下的调 Q 脉冲参数, 并进行了分析讨论. 实验中所观察到的脉冲稳定性比文献[3]中激光二极管泵浦 Nd:YLF 调 Q 的结果略差一些, 其主要原因是 Nd:YAG 激光没有线偏振特性, 致使光场与声场作用时的稳定性变差, 可在光路中加布儒斯特片以产生线偏振从而提高脉冲稳定性.

### 参 考 文 献

- [1] D. C. Shannon, R. W. Wallace, High power Nd:YAG laser endpumped by a cw, 10 mm  $\times$  1  $\mu$ m aperture, 10-W laser-diode bar. *Opt. Lett.*, 1991, 16(5): 318
- [2] T. R. Steele, D. C. Gerstenberger, A. Drobshoff *et al.*, Broadly-tunable high-power operation of an all-solid-state titanium-doped-sapphire laser system. *Opt. Lett.*, 1991, 16(6): 399
- [3] 周复正, 朱三义, 马建伟等, 量子阱激光二极管泵浦 Nd:YLF 固体激光器的调 Q. *中国激光*, 1992, 19(12): 881
- [4] Li Zhenhua, Fan Qikang, Zhou Fuzheng, Dynamics of LDA-pumped Q-switched NYAB laser. ICNOPA' 93, F01, Nanjing, China

## A CW and High Repetitive Q-Switched Nd:YAG Laser Pumped by Laser Diode Array

Hu Wentao      Zhou Fuzheng      Chen Youming  
Shen Xiaohua      Jiang Zhonghong

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

(Received 1993; revised 1993)

**Abstract** A 1 W homemade MQW-LDA pumped Nd:YAG laser is reported here, continuous output power of 112 mW and overall optical efficiency of 10% were obtained. By using Q-switching, the peak power of 355 W and the pulse width of 40 ns have been observed at pulse repetition rate of 1 kHz. When the pulse repetition rate is 10 kHz, an average output power of 43.7 mW with single pulse width of 70 ns was achieved.

**Key words** DPL, high repetitive Q-switched laser.