

量子阱激光二极管泵浦 Nd:YLF 固体 激光器的调 Q*

周复正 朱三又** 马建伟 肖建伟*** 沈小华 张振亚**** 沈丽青 范滇元

(中国科学院上海光机所, 201800)

摘要: 用国产脉冲功率 200 mW 的多量子阱激光二极管阵列(MQW-LDA)泵浦 Nd:YLF 固体激光器, 实现了声光调 Q。得到激光的脉宽 70 ns, 能量 1 μ J, 重复频率 100 Hz, 波形起伏小于 1%。

关键词: 声光 Q 开关, 泵浦

Q-switching of MQW-LDA pumped Nd:YLF laser

*Zhou Fusheng, Zhu Sanyou, Ma Jianwei, Xiao Jianwei, Shen Xiaohua, Zhang Zhenya,
Shen Liqing, Fan Dianyuan.*

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

Abstract: Acousto-optic Q-switching of a homemade MQW-LDA pumped Nd:YLF laser has been realized. A pulse width of 70 ns, energy of 1 μ J at 100 Hz repetition rate have been obtained. The fluctuation of profile is less than 1%.

Key words: acousto-optic Q-switching pumping

一、引言

半导体激光泵浦的固体激光调 Q 器件(DPL)近年来在国际上发展迅速。在激光雷达、激光测距、光电对抗等多方面应用中, 显露潜在优势^[1]。声光 Q 开关的速度不及电光开关, 但声光调制器具有较小的腔内插入损耗, 适合于半导体激光泵浦固体激光器件。国际上 DPL 声光调 Q 输出平均功率达 1.6 W (20 ns、160 μ J、10 kHz)^[2]、脉冲输出功率达 500 kW (4 mJ、8 ns)^[3], 其倍频用于泵浦 Ti 宝石激光器, 得到波长在 696~1000 nm 范围连续可调谐、稳定的激光输出。

我们先后实现了国产半导体激光泵浦固体激光器输出^[4]、DPL 的增益开关效应^[5]、以及 DPL 的倍频和自倍频^[6]。本文首次报道用国产多量子阱激光二极管阵列器件泵浦 Nd:YLF 固体激光器声光调 Q 的实验结果和分析计算。

收稿日期: 1992 年 3 月 25 日; 修改稿收到日期: 1992 年 5 月 8 日。

* 本研究为上海自然科学基金资助项目。 ** 上海激光所; *** 北京半导体所; **** 机电部 1411 所。

二、声光开关

对泵浦功率为 100~500 mW、固体激光腔基模尺度为 100~200 μm 、静态光学总损耗为 3~6%、腔长为 30~80 mm 的 DPL 器件, 设计并研究了小型、低插入损耗、高衍射效率的专用声光 Q 开关, 其结构和声光作用原理如图 1 所示。

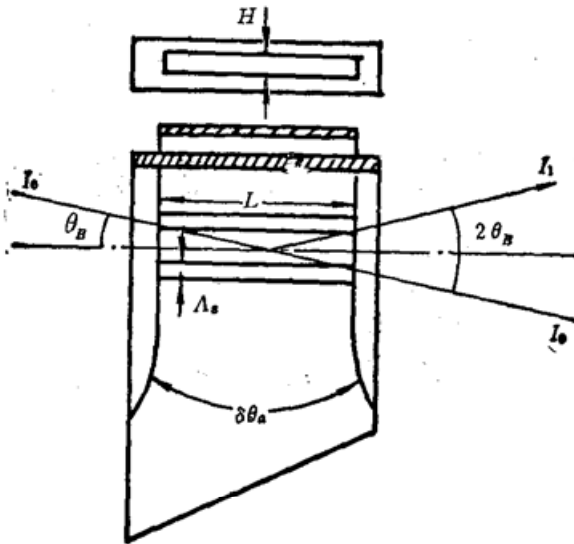


Fig. 1 Construction and action of A-O modulation

当入射光束与声束波面成布喇格角时, 满足布喇格衍射条件:

$$\sin \theta_B = \lambda_0 / 2n\Lambda_s$$

式中 θ_B 为布喇格角, λ_0 为自由空间光波长, Λ_s 为声波长, n 为声光介质折射率。如果

$$Q = \frac{K_s^2 L}{K} \geq 4\pi, \quad R = \frac{\delta\theta_a}{\delta\theta_0} = 1$$

则声光相互作用进入布喇格区, 且满足光波矢与声波矢的动量匹配。式中 K_s 为声波矢, K 为光波矢, L 为声光作用长度, $\delta\theta_a$ 为声束发散度, $\delta\theta_0$ 为光束发散度。一级衍射效率为

$$\eta_1 = \frac{I_1}{I_0} = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0} \left(\frac{M_2 L P_a}{2H} \right)^{1/2} \right]$$

式中 I_0 为入射光强, I_1 为一级衍射光强, H 为换能器高度, P_a 为超声功率, M_2 为声光介质优质系数。通过改变 RF 激励功率控制超声功率, 使衍射效率变化, 形成声光开关作用。

根据以上公式和 DPL 要求, 研制了声光 Q 开关。声光介质为熔石英玻璃, 声光作用长度 $L=16\text{ mm}$, 有效作用口径 $\phi 0.5\text{ mm}$, 衍射角 $\theta_B=4.87\text{ mrad}$, 两端镀 $1.05\ \mu\text{m}$ 高增透膜, 插入损耗小于 1%。压电换能器为 $Y36^\circ$ 切向的 LiNbO_3 晶体, 超声频率 $f_0=80\text{ MHz}$, 用真空钎焊工艺和 T 型匹配网络达到良好电声匹配, 使 RF 激励功率有效地转换成光声介质的声纵波。阻抗为 $50\ \Omega$ 时, $\text{VSWR} \approx 1$ 。驱动功率 1~5 W 可变, 一级衍射效率 15~30% 可调。用 He-Ne 激光检验, 当激光线偏振方向与声纵波波面垂直时, 在 1W RF 功率激励下, 衍射效率达 30%。

三、DPL 调 Q 实验

DPL 声光调 Q 实验装置如图 2 所示。国产分子束外延(MBE)设备研制的 20 条 $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ 多量子阱阵列器件阱宽 10 nm、条宽 $5\ \mu\text{m}$ 、间距 $3\ \mu\text{m}$, 总发光面尺寸为 $160\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 。半导体热电堆控制温度在 18°C 时, MQW-LDA 辐射中心波长为 790.7 nm, 谱宽 3 nm, 落在 Nd:YLF 晶体的次吸收峰内。在脉冲宽度为 400 μs 、重复频率为 100 Hz 的电方波驱动下, 阈值电流为 650 mA, 当驱动电流增至 1.4A 时, MQW-LDA 脉冲输出功率 200mW。光学耦合为焦点共轭成像, 用二维 OCD(500×582 光敏元)图像处理系统测量焦斑尺寸为

315 $\mu\text{m} \times 77 \mu\text{m}$, MQW-LDA 的近场和远场光强分布如图 3 所示。近场强度呈多条状分布, 但焦点光强为单值极大, 适合纵向端面泵浦固体激光器。

固体激光器设计为准共焦腔结构, 以便在腔内形成细光束有利于声光作用。选择 α 轴取向切割 Nd:YLF 晶体, 在 π 偏振 (1.047 μm) 有较大的增益截面, 以降低泵浦阈值功率。晶体长 5 mm, Nd 浓度 1%, 输入端为

平面, 对 1.05 μm 波长反射 99.6%, 对 0.8 μm 透过 85%。另一端为球面, 曲率 $R=50 \text{ mm}$, 对波长 1.05 μm 高增透。输出端为平凹反射镜, 曲率 $R=50 \text{ mm}$, 对波长 1.05 μm 透过 2%。固体激光器腔长 60 mm, TEM₀₀ 模尺度 $\omega_0=90 \mu\text{m}$ 。

声光 Q 开关置于固体激光器腔内光腰处, 分离元件谐振腔的弛豫振荡阈值泵浦功率约

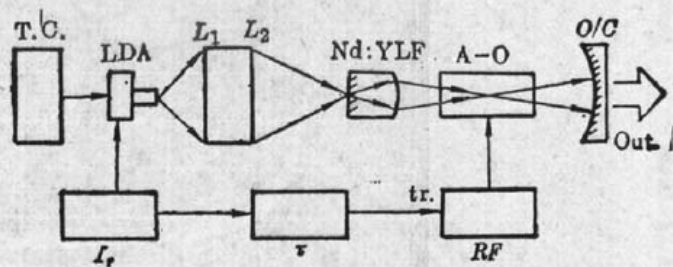


Fig. 2 Schematic diagram of A-O Q-switched laser

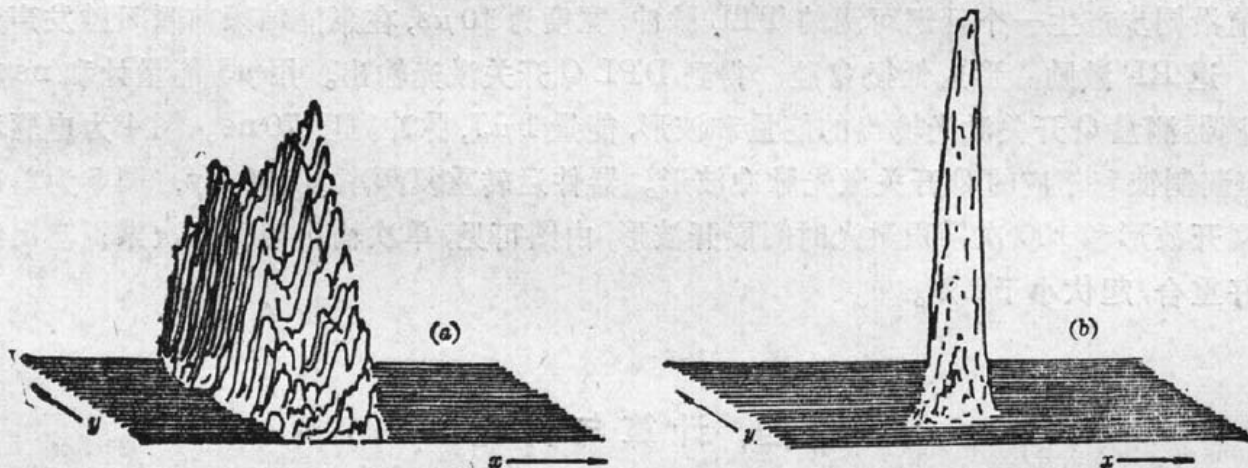


Fig. 3 Intensity distribution of MQW-LDA

(a) direct output; (b) at focus

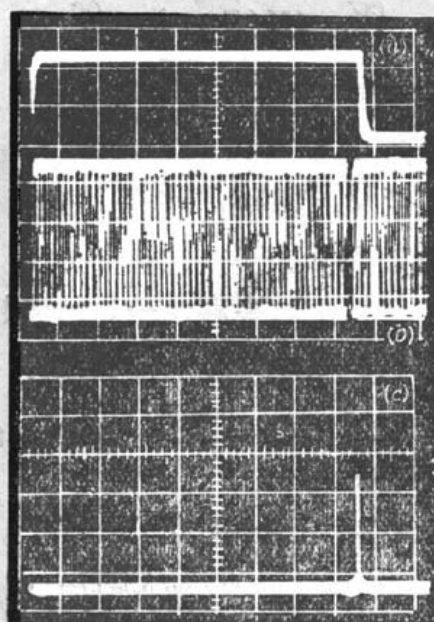


Fig. 4 Q-switching of MQW-LDA pumped Nd:YLF laser

(a) driving current pulse; (b) A-O modulation waveform; (c) Q-switched laser pulse

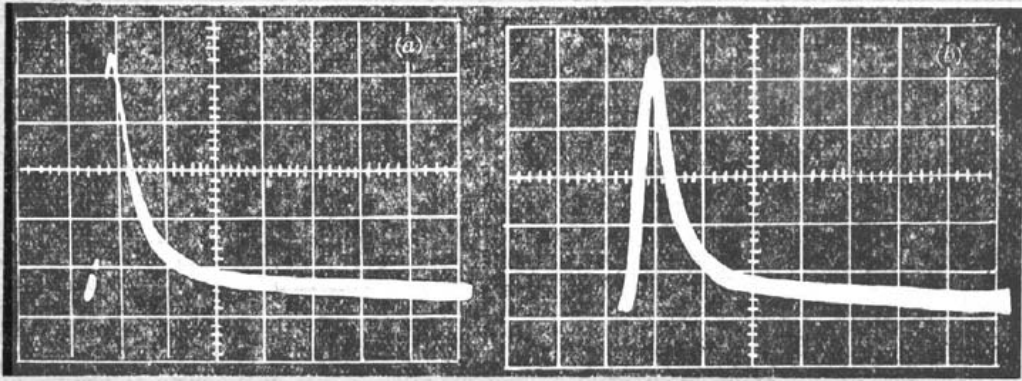


Fig. 5 Temporal waveform profile of Q-switched Nd:YLF laser
(a) single laser pulse (0.1 μs/div); (b) 100-times of record accumulated (0.1 μs/div)

60 mW。为获良好的声光衍射作用，旋转 Nd:YLF 晶体，使 DPL 激光输出的偏振方向与声光场作用方向垂直。置声光调制器于 RF 激励状态，形成高损 Q 腔。用 MQW-LDA 的电驱动方波前沿同步产生一个延迟可调的 TTL 脉冲，宽度为 10 μs，在泵浦结束前瞬间触发声光驱动电源，退 RF 激励，形成低损 Q 腔，得到 DPL Q 开关激光输出。用 μJ 能量计和 ns 响应 PIN 探测器测量 Q 开关激光输出的能量和波形，能量 1 μJ，脉冲宽度 70 ns。图 4 为电驱动脉冲、电声调制波和相应的 Q 开关激光脉冲波形。器件运转重复频率为 100 Hz，图 5 为单次激光时间展开波形和 100 次累积激光时间展开波形，由图可见，单次输出与 100 次累积输出激光波形良好重合，起伏小于 1%。

四、计算与讨论

在速率方程近似下，当 Q 开关没被打开时，腔处于高损态，速率方程组为^[7]

$$\begin{cases} \frac{d\Delta N}{dt} = W - \frac{c\sigma}{LA} \Delta N S - \frac{\Delta N}{\tau_f}, & t \leq t_1 & (1-a) \\ \frac{dS}{dt} = \frac{c\sigma}{LA} \Delta N (S+1) - \frac{\delta c}{2L} S, & t \leq t_1 & (1-b) \end{cases}$$

其中 ΔN 与 S 分别为反转粒子数与光子数， W 为 Nd:YLF 纯吸收的泵浦光速率， c 为光速， σ 为受激发射截面， τ_f 为上能级寿命， L 为腔长， A 为 TEM₀₀ 模在棒端面的截面积， $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ ， δ 是 Q 开关未打开时的总损耗， δ_1 为输出耦合镜的透射损耗， δ_2 为声光晶体的调制损耗， δ_3 为其它损耗， t_1 为 Q 开关触发起始时间。

在 Q 开关被触发打开瞬间，由于声场消失存在一定的渡越时间，腔处于损耗陡变暂态。设声消失方式按指数衰减，于是在暂态过程中的速率方程组为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta N}{dt} = W - \frac{c\sigma}{LA} \Delta N S - \frac{\Delta N}{\tau_f}, & t_1 < t \leq t_s & (2-a) \\ \frac{dS}{dt} = \frac{c\sigma}{LA} \Delta N S - \frac{c}{2L} S \cdot \delta \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_4}\right)^{(t_1-t)/t_s}, & t_1 < t \leq t_s & (2-b) \end{cases}$$

式中 $\delta \cdot (\delta/\delta_4)^{(t_1-t)/t_s}$ 为损耗衰减函数， t_s 为声场消失时间， $\delta_4 = \delta_1 + \delta_3$ 。

当 Q 开关完全打开后，损耗项就只有 δ_4 ，将方程(1-b)中的 δ 换成 δ_4 ，得到 Q 开关完全打开后的速率方程组表达式：

$$\begin{cases} \frac{d\Delta N}{dt} = W - \frac{c\sigma}{LA} \Delta N S - \frac{\Delta N}{\tau_f}, & t_s < t \\ \frac{dS}{dt} = \frac{c\sigma}{LA} \Delta N S - \frac{\delta_4 c}{2L} S, & t_s < t \end{cases} \quad (3-a)$$

$$\begin{cases} \frac{d\Delta N}{dt} = W - \frac{c\sigma}{LA} \Delta N S - \frac{\Delta N}{\tau_f}, & t_s < t \\ \frac{dS}{dt} = \frac{c\sigma}{LA} \Delta N S - \frac{\delta_4 c}{2L} S, & t_s < t \end{cases} \quad (3-b)$$

用四阶 Runge-Kunta 方法对上述 3 个方程组联立求数值解, 计算参数选取为: $W = 4.02 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $L = 60 \text{ mm}$, $\tau_f = 480 \mu\text{s}$, $\sigma = 3.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $A = \pi \times (100 \mu\text{m})^2$, $\delta_1 = 2\%$, $\delta_2 = 17\%$, $\delta_3 = 1\%$, $t_s = 100 \text{ ns}$, $t_1 = 390 \mu\text{s}$ 。计算的声光调 Q 激光脉冲波形如图 6 所示, 脉冲宽度 $\tau = 52 \text{ ns}$, 能量 $E = 6.2 \mu\text{J}$ 。

计算值优于实验结果, 这是由于计算考虑的泵浦光与固体激光器有良好的模式匹配, 而实际实验的泵浦光焦斑大于固体激光基模尺寸, 有效泵浦光功率较低。另外, 计算的 σ , τ_f 参数均引用 Nd:YLF 的主吸收峰 797 nm 处数据, 而实际使用的 MQW-LDA 的中心波长为 790.7 nm, 且有较大的谱线宽度, 有效光谱吸收较低。作为进一步研究, 选择固体激光介质和二极管激光器, 使之达到较好的光谱吸收; 设计柱面-非球面光耦合器, 提高耦合效率; 在声光介质反射面增加吸收材料, 建立稳定的声场; 改变输出腔耦合度, 提高激光输出功率。

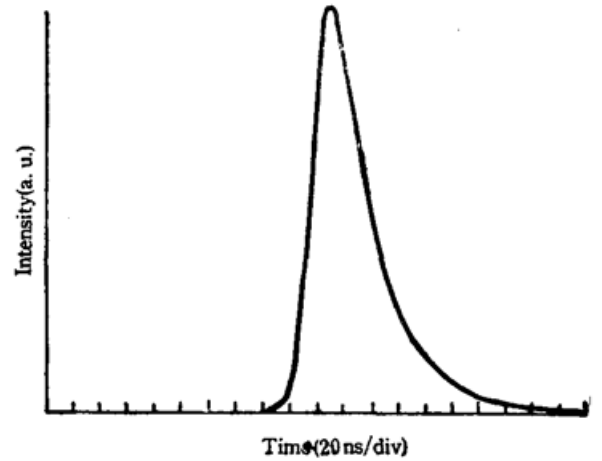


Fig. 6 Calculated waveform profile of Q-switched Nd:YLF laser

研究过程中得到沈冠群、张正泉、范瑞英、徐俊英、张敬明、陈广民等人的帮助, 谨表衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 W. C. Schwartz *et al.*, *Laser Focus World*, **75**, July(1991)
- 2 D. G. Shannon *et al.*, *Opt. Lett.*, **16**, 318(1991)
- 3 T. R. Steele *et al.*, *Opt. Lett.*, **16**, 399(1991)
- 4 Zhou Fuzheng *et al.*, *SJSL*, **8A4**, Nov. 8~9(1990)
- 5 周复正 *et al.*, *中国激光*, **18**(11), 806(1991)
- 6 周复正 *et al.*, *激光与红外*, **22**(2), 1(1992)
- 7 P. E. Perkins *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B*, **4**, 1066(1987)