

# 同时锁模/调 Q 激光技术的研究

刘耀兰 兰信钜 李洪谱

(华中理工大学激光研究所, 武汉, 430074)

**摘要:** 分析了同时锁模/调 Q 激光器的工作原理。采用预激光技术实现了同时锁模/调 Q 稳定运转。获得了脉宽为 172ps、峰值功率为 305kW 的稳定脉冲, 比单独锁模时提高  $10^3$  倍。

**关键词:** 同时锁模/调 Q 预激光技术

## Study on simultaneously mode-locked and Q-switched Nd:YAG laser technology

Liu Yaolan, Lan Xinju, Li Hongpu

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST)

**Abstract:** In this paper, we analyzed principle of a simultaneously active mode-locked and Q-switched Nd:YAG laser. This system generates pulse width of 172ps and pulse peak power of 305kW with good stability and reliability. The peak power is  $10^3$  time as large as the peak power of mode-locked laser.

**Key words:** simultaneously mode-locked and Q-switched pre-lase technology

### 一、引 言

主动锁模激光器可以获得稳定、无次结构的纳秒脉冲序列。但是输出的超短脉冲能量小, 峰值功率不高, 其应用受到限制。

被动锁模激光器输出能量大, 峰值功率高, 但是输出稳定性差。主被动锁模激光器输出稳定性得到很大改善, 但仍不能消除输出脉冲的次结构。

声光调 Q 激光器可以使其峰值功率比连续激光器的功率高  $10^4$  倍。若在连续激光器内同时放置主动锁模调制器和声光 Q 开关, 不仅稳定性好, 又能获得高的峰值功率。

### 二、同时锁模/调 Q 激光器的工作原理

图 1 是在连续 Nd:YAG 激光器腔内, 同时锁模/调 Q 的结构示意图。由 Kuizenga 等人均

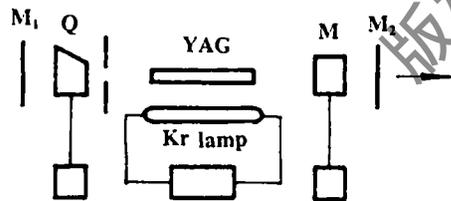


Fig.1 The experimental setup of an active mode-locked/Q-switched Nd:YAG laser

匀加宽锁模激光器理论, 稳态条件下自洽解<sup>[1,2]</sup>  
脉冲宽度:

$$\Delta t_m^0 = \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{\pi} g_0^{1/4} \left( \frac{1}{\delta_m \cdot f_m \cdot \Delta \nu_g} \right)^{1/2} \quad (1)$$

脉冲带宽:

$$\Delta \nu^0 = \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{1}{\Delta t_m^0} \quad (2)$$

式中,  $g_0$  为 Nd:YAG 中心频率处, 激光在腔内往返一周的饱和增益;  $\Delta\nu_g$  为激光介质的增益线宽, 对 Nd:YAG 为 120GHz;  $f_m$  为声光调制频率;  $\delta_m$  为调制器的调制深度。

在图 1 所示连续 Nd:YAG 激光器腔内, 同时放置声光调制器和声光 Q 开关时, 由于稳态锁模脉冲的形成时间比调 Q 脉冲的形成时间大得多, 为了获得变换极限的锁模脉冲, 在带有 Q 开关的锁模激光器内, 必须加长脉冲形成时间。

采用预激光技术实现了带有调 Q 包络的、重复 Q 开关猝发的、变换极限的脉冲序列输出。所谓“预激光”是使 Q 开关在完全开启前处于部分开启状态, 激光振荡刚好能够建立, 逐步使激光稳定在很低功率水平振荡, 形成无次结构的稳态脉冲。而后, 突然开启 Q 开关, 迅速减小腔内损耗, 这些预激光期间形成的脉冲, 在调 Q 建立时间内迅速放大, 获得高功率、变换极限的脉冲序列。这一过程示于图 2。

为了确定预激光所需的时间, 必须研究瞬态锁模。在预激光过程中, 会产生两个相反的过程: 其一, 腔内光场反复通过调制器, 使光脉冲变窄; 其二, 腔内光场反复通过 Nd:YAG 晶体时, 频带变窄、脉宽增宽。首先分析光脉冲变窄、频宽加宽过程。考虑介质的原子线宽的条件下, 腔内的光场经历为数不多的往返后便变成高斯脉冲<sup>[2]</sup>, 假设高斯脉冲  $e^{-\alpha^2}$  往返一周变化  $\Delta\alpha$ , 经历  $N$  次往返后, 脉宽变为:

$$\Delta t_m = [\tanh(N/N_0)]^{-1/2} \cdot \Delta t_m^0 \quad (3)$$

式中, 
$$N_0 = \frac{1}{4\sqrt{g}} \cdot \frac{\Delta\nu_g}{\delta_m f_m} \quad (4)$$

由 tanh 函数的性质, 当 
$$N > 1.52N_0 \quad (5)$$
 或 
$$N > (0.38/\sqrt{g}) \cdot [\Delta\nu_g/(\delta_m f_m)]$$

时,  $\Delta t_m$  可不超过稳态值  $\Delta t_m^0$  的 5%。YAG 晶体的  $\Delta\nu_g$  为 120GHz, 选取  $f_m$  为 100MHz,  $g_0$  为 0.36 时,  $N > \frac{0.76}{\delta_m} \times 10^3$ 。实测调制器的调制深度为 0.377, 因此达到稳态的次数  $N > 2.02 \times 10^3$ , 相应的时间大于  $10\mu s$ , 比调 Q 的形成时间大得多。

下面分析频宽变窄、噪声平滑。当噪声反复通过 YAG 晶体时, 噪声频谱很快变成高斯型, 其带宽为:

$$\Delta\nu_n = \sqrt{\ln 2/(2Ng)} \cdot \Delta\nu_g \quad (6)$$

若到达(4)式所表达的稳态值, 腔内只有中心频率和它的边频振荡被保存, 其余的模全消失了。出现这种状态的条件是噪声带宽应小于谐振腔的纵模间隔。对于调幅驻波场而言  $\Delta\nu_n < 2f_m$ 。则

$$N > [\ln 2/(8g)] \cdot (\Delta\nu_g/f_m)^2 \quad (7)$$

在我们的条件下,  $N > 3.5 \times 10^5$ , 相应时间 1.5ms。

### 三、实验研究

1. 实验装置: 图 1 为 Nd:YAG 锁模/调 Q 激光器, YAG 晶体长 100mm, 直径 4mm;  $M_1$  为全反镜,  $M_2$  为输出镜, 反射率 85%, 腔长 750mm; 声光调制器和声光 Q 开关均采用熔融石英, 其长度分别为 59mm 和 76mm, 频率为 100MHz 的驻波场及 40MHz 的行波场; 腔内插入  $\varnothing 1.2$

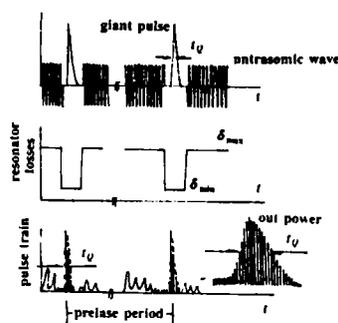


Fig. 2 The principle of pre-lase technology

~1.6 小孔光栏。

为了使输出稳定,用三根石英管作为谐振腔的支撑件,使腔长控制在  $0.2\mu\text{m}/\text{C}$ ;二次循环水冷;泵浦电源具备电流反馈等。

2. 声光锁模调制器:采用通光性能好、插入损耗小的熔融石英作声光介质,按锁模要求调制频率为 100MHz,根据

驻波条件, 
$$h = q(\lambda_s/2) \tag{8}$$

Bragg 条件, 
$$G = (2\pi\lambda_0 l_m)/(\lambda_s^2 \cos\theta_s) \gg 1 \tag{9}$$

及通光孔径大小选取调制器尺寸为  $59\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。(8)和(9)式中  $\lambda_s$  为超声波长,  $\lambda_0$  为激光波长。采用机电耦合系数大、Y-36°切割的  $\text{LiNbO}_3$  晶体作电声换能器。调制器驱动源由置于恒温槽内的 100MHz 晶振作主振器,驱动源输出功率为 3.15W,频率为 99.99964MHz,其不稳定性为  $10^{-7}/\text{d}$ 。最后用功率计法测量了调制深度为 37.7% [3]。

3. YAG 晶体在腔内位置的选择:由(1),(5),(7)式表明,为了获得窄的短脉冲宽度,缩短脉冲形成时间,应选取较深的调制深度及较高的调制频率。我们取  $f_m$  为 100MHz,对应的腔长应为 750mm,对应的几何长度则更短。YAG 晶体及熔融石英的折射率为  $n_a$  及  $n_m$ ,腔内仅插入声光调制器时的几何长度  $l_m$  为 640.8mm,同时插入声光调制器和 Q 开关时的几何长度  $l_{m+\theta}$  为 605.9mm。由于几何长度短,为了减少激光晶体热效应对输出稳定性的影响,晶体在谐振腔内放置的位置显得极为重要。设  $l_1$  和  $l_2$  分别为晶体中心对  $M_1$  及  $M_2$  镜的光程,实验表明当  $r = l_1/l_2$  为 1.2~1.3 时输出最佳,图 3 的实验曲线与文献[4]的结论一致。

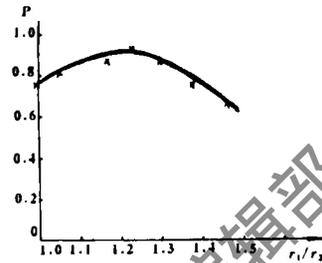


Fig.3 Output as a function of  $r = l_1/l_2$

4. 锁模脉冲的瞬态形成:借助计算机数值计算模拟短脉冲形成的瞬态过程。图 4~6 是当 N 取不同值时短脉冲的光强分布及频谱分布[5]表明当 N 为  $10^5$  以后,(相应时间约 1ms)锁模已进入了稳态。图中调制频率为 100MHz,调制深度为 0.41,原子线宽为 120GHz,小信号增益为 0.36,腔损耗为 0.16。该值与我们的实测值为 1ms 是一致的,与前面分析的结论吻合。

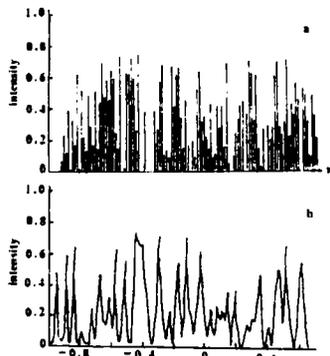


Fig.4 The primary pulse intensity  
a - frequency domain  
b - time domain

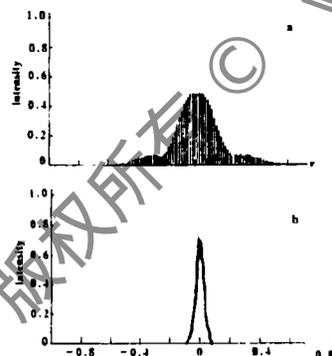


Fig.5 Laser intensity after  $10^4$  time reflections  
a - frequency domain  
b - time domain

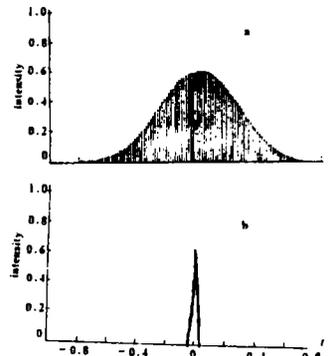


Fig.6 Laser intensity after  $10^5$  time reflections  
a - frequency domain  
b - time domain

5. 锁模/调 Q 激光的输出特性:图 7 是测量短脉冲示意图。用 145 型功率计测平均功率;用光电二极管和示波器测脉冲序列、锁模周期  $T_m$  为 5ns、调 Q 周期  $T_Q$  为 1.25ms、调 Q 脉宽

# 材料加工用激光束质量初探

陈培锋 陈涛 丘军林

(华中理工大学激光研究所, 武汉, 430074)

**摘要:** 本文从激光材料加工的角度讨论了以  $M^2$  参数作为光束质量评价标准的可能性。指出对穿透式的加工方式,  $M^2$  参数可以表示光束的实用价值, 但对表面加工方式,  $M^2$  参数的大小并不能反映光束实际的实用价值。

**关键词:**  $M^2$  参数 光束质量 材料加工

## Preliminary study about the beam quality in laser material processing

Chen Peifeng, Chen Tao, Qiu Junlin

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST)

**Abstract:** In this paper, from the point of material processing, we have discussed the possibility of using  $M^2$  factor to evaluate laser beam quality. It has been pointed out that  $M^2$  factor is suitable for evaluation of beam quality in the so-called penetrating processing (i. e., welding, cutting, drilling, etc.), but it's not suitable in the so-called surface processing (i. e., surface heat treatment, marking, etc.)

**Key words:**  $M^2$  factor beam quality material processing

$\Delta t_Q$  为 150ns; 用二次谐波法测得锁模脉宽  $\Delta t_m$  为 172ps; 得到单独锁模时峰值功率为 166W, 而锁模/调 Q 时峰值功率为 305.2kW, 比前者高  $10^3$  倍。图 8 是锁模脉冲序列和二次谐波法测得的相关曲线。

综上所述: Nd:YAG 主动锁模/调 Q 激光采用预激光技术, 可以获得无次结构的高峰值功率短脉冲。预激光时间选择在 1~1.5ms 之间, 相当于光子在腔内往返  $10^5 \sim 10^6$  次。

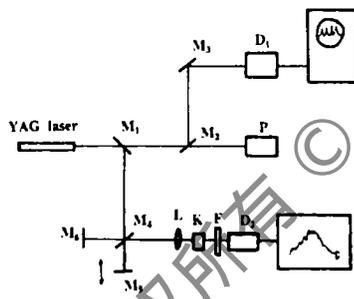


Fig. 7 Schematic of a measurement system for the actively mode-locked/Q-switch laser

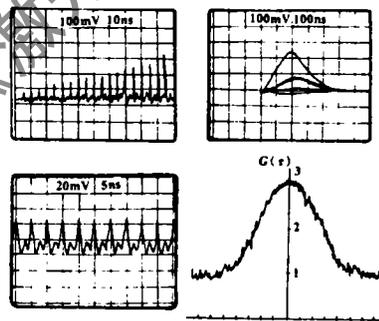


Fig. 8 Output pulse train and autocorrelation curve of SHG

### 参 考 文 献

- 1 Kuizenga D J. IEEE J Q E, 1981;QE-17:1694
- 2 Kuizenga D J, Phillion D W, Lund T et al. Opt Commun., 1973;9:221
- 3 于连生. 激光, 1979;(6):33
- 4 Silvesteri S De, Laporta P, Magni V. Opt Commun, 1986;57:339
- 5 李洪谱, 兰信钜, 刘耀兰. 激光技术, 1994;18(1):12