

高功率YAG锁模/调Q激光器的研究

刘耀兰 蓝信炬 陈同生 李洪谱

(华中理工大学激光研究所, 武汉, 430074)

摘要: 本文分析研究了高功率YAG锁模/调Q激光器的工作原理、实验装置、腔型设计及参数选择, 介绍了该激光器分别在单独锁模和锁模加调Q情况下的输出特性。

An analysis of high power active-mode-locked Q-switched YAG laser

Liu Yaonan, Nan Xingju, Cheng Tongshen, Li Hongpu
(Institute of Laser, HUST)

Abstract: This paper analyzes the operation theory, experimental set, cavity design and design parameters of the active-mode-locked Q-switched YAG laser, and introduces the performance characteristics of the single mode-locked laser and mode-locked Q-switched laser, respectively.

一、引 言

锁模激光器是获得ps量级超短光脉冲的主要方法。稳定的高功率超短脉冲是研究激光光谱学、非线性光学、超快物理现象、化学、生物等基础学科的重要工具, 同时也是激光远程精密测距、激光核聚变、光通信、光纤测试、大规模集成电路特性检测的重要光源设备。

声光主动锁模激光器可以获得重复性好、稳定可靠的超短脉冲, 但是其单脉冲能量仅 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{J}$, 峰值功率仅 $10^2 \sim 10^3 \text{W}$ 。若采用被动锁模、或主被动锁模等方式, 虽然能提高单脉冲能量及峰值功率, 但是输出稳定性差。若采用主动锁模选出单脉冲后, 再放大, 虽然可以提高单脉冲能量^[1], 但是需用几个单元技术才能完成, 其机构庞大, 价格昂贵。为此, 国外普遍采用主动锁模加调Q来获得稳定的高功率激光输出^[2~4]。我们在原来承担的“Nd:YAG声光主动锁模激光器”项目的基础上采用锁模加调Q的新技术, 经过两年的研究和实验, 现已研制出高功率YAG锁模/调Q激光器样机。本文将介绍该激光器的基本原理、实验装置、激光器的设计以及参数选择和激光器的性能指标。

二、锁模加调Q激光器基本理论

1. 锁模原理

自由运转的激光器其输出是一种无规则的尖峰脉冲, 由于各模相位没有固定的联系, 输出脉冲宽度宽、峰值功率低。如果在腔内加入调制频率 $f_M = c/2l$ 的声光调制器 (l 为谐振腔

腔长), 光脉冲的自治解表明: 它们通过调制器时, 激光脉冲宽度被压缩, 而通过激活介质 YAG 时, 激光脉宽又被展宽, 腔内光子在腔内多次往返, 而当上述两个过程达到平衡时, 锁模进入稳定状态, 其脉宽表达式为:

$$\Delta t_M = \frac{(\sqrt{2 \ln 2})^{1/2}}{\pi} \left(\frac{g_0}{\delta_1} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{f_M \Delta \nu_g} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, f_M 为调制频率, 应取其等于相邻纵模间隔; g_0 为腔内光子往返一次的小信号增益; δ_1 为调制深度; $\Delta \nu_g$ 为激活介质线宽。

如果失谐 (在锁模失谐范围内), 或者腔内存在标准具效应时会引起锁模脉宽增宽, 在标准具带宽远小于激活介质带宽时, 锁模脉宽为

$$\Delta t_M' = \frac{(\sqrt{2 \ln 2})^{1/2}}{\pi} \left(\frac{1}{\delta_1} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{f_M \Delta \nu_e} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中, $\Delta \nu_e$ 为标准具带宽。

$$\Delta \nu_e = \frac{c}{2\pi n l} \sqrt{\frac{8}{R}} (1-R) \quad (3)$$

式中, n 为标准具介质折射率; l 为标准具介质通光长度; R 为标准具端面反射率。激光输出峰值功率为

$$P_p = \frac{\bar{P}_M}{f_M \Delta t_M} \quad (4)$$

式中, \bar{P}_M 是锁模平均功率。

2. 预激光锁模/调Q原理

将锁模调制器和 Q 开关放在同一个谐振腔内, 插入的 Q 开关不使激光完全关死, 保持锁模能逐渐形成, 并达到稳态, 这时所产生的连续锁模称为“预激光”。当锁模进入稳态后, 使 Q 开关突然开启, 稳定的锁模脉冲在 Q 开关时间内迅速放大, 产生 Q 开关猝发的、规则有序的锁模脉冲, 这时获得的锁模宽度不变, 带有声光调 Q 包络的锁模脉冲序列, 如果事先我们让 Q 开关与锁模调制器同时工作, 声光调 Q 脉冲的形成时间约 $0.5 \sim 2 \mu\text{s}$, 而锁模脉冲的建立时间为 $0.5 \sim 1.5 \text{ms}$, 比前者慢得多, 因此如果二者同时开启工作, 则必然是调 Q 先形成, 因而无法实现锁模。为此, 我们采用“预激光”(锁模)技术。使锁模脉冲达到稳态, 光脉冲在腔内往返的次数为^[2]

$$N > \frac{\ln 2}{2g_0} \left(\frac{\Delta \nu_g}{\Delta \nu_e} \right) = \frac{\ln 2}{2g_0} \left(\frac{\Delta \nu_g}{f_M} \right)^2 \quad (5)$$

式中, $\Delta \nu_g = c/2l$ 代表相邻纵模间隔。

但是对不同状态的激光器, N 的表达式不尽相同, Davies 对此进行了研究^[3]。

在我们的激光器中, $g_0 = 0.3 \sim 0.4$, 则 $N = 10^5$, 相应锁模达到稳态所需时间

$$t = 2l \cdot N / c = 0.5 \sim 1 \text{ms}$$

再开启 Q 开关, 便可以实现锁模加调 Q 的激光输出, 即获得带有调 Q 包络的锁模脉冲, 此时峰值功率:

$$P_p' = \frac{\bar{P}_{M+Q} \cdot T_M}{f_Q \cdot \Delta t_Q \cdot \Delta t_M} \quad (6)$$

式中, $\overline{P_{M+Q}}$ 为锁模调Q时的平均功率; Δt_M 为锁模脉宽; Δt_Q 为调Q脉宽; $T_M = \frac{1}{f_M}$ 为锁模脉冲周期; f_Q 为调Q脉冲的频率。

三、实验装置

高功率Nd:YAG锁模/调Q激光器原理图如图1所示。其谐振腔采用反射率为99.9%的全反镜 M_2 和反射率为90%,85%的输出镜 M_1 组成。激光工作物质为 $\phi 4\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的Nd:YAG棒。腔内插入 $\phi 1.6\text{mm}$ 的光阑选模。本装置采用声光调制器AOM和声光Q开关AOQ完成锁模损耗调制及Q开关功能,两个声光器件均从Y-36°切割的LiNbO₃作换能器,其长度分别为59mm及76mm, S_1 和 S_2 分别是它们的高频超声驱动源,前者输出是频率为100MHz的稳定正弦波,后者是频率为40MHz的脉冲调制波,调制信号频率为1~10kHz。主电源采用串联负反馈稳流电源泵浦Kr灯。采用二次循环水冷系统冷却。

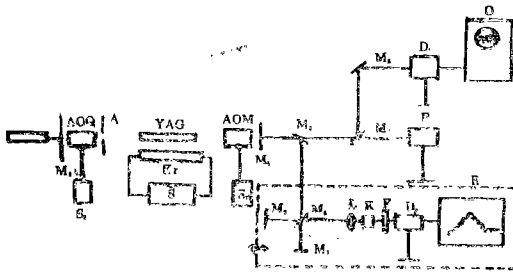


Fig. 1 The setup of high power YAG mode-locked/Q-switched laser

图1的右部分是该激光器的测试设备。其中P为148型激光功率计,用以测量激光平均功率。D₁为PIN光电二极管用以探测输出激光的时间特性,在此我们用它测锁模脉冲序列、锁模/调Q脉冲包络、Q开关脉宽、调Q脉冲的周期。O为7904示波器用来显示探测器D₁的信号。虚线部分是二次谐波相关测量系统,用以测量锁模脉宽。

四、锁模加调Q激光器的设计及参数选择

Nd:YAG锁模加调Q激光器由YAG激光器、锁模调制器、Q开关及小孔光阑、主电源、两个超声驱动源及水冷系统组成。

1. Nd:YAG激光器

主动锁模激光器要求腔长稳定,泵浦、主电源稳定性高,我们采取了以下措施:

(1) 用三根石英作为谐振腔两个反射镜的支撑件,石英玻璃的温度膨胀系数很小,从而使腔长稳定。

(2) 为了提高机械稳定性,把支撑腔镜的支撑件与激光头分离,以减少冷却水引起的不稳定。

(3) 主电源采用负反馈稳流措施,提高泵浦源的稳定性。

(4) 为了减少冷却水不均匀对激光输出的影响,采用水箱循环,二次冷却系统。

(5) 采用螺旋测微头调节谐振腔,其调节方便、精度高、稳定性好。

(6) 用计算机辅助设计选择热稳范围较大的谐振腔。

(7) 我们选择 $f_M = 200\text{MHz}$,则谐振腔长

$$L = c/2f_M = 750\text{mm} \tag{7}$$

考虑到Nd:YAG棒、调制器的折射率后,实际几何长度应为640mm。

2. 声光调制器

采用插入损耗小, 透光性能好的熔融石英作为声光介质。选择驻波场, 布喇格衍射方式以获得较高的衍射效率, 采用机电耦合系数较大的Y—36°切割的LiNbO₃作为电声换能器。选择 $f_M = 200\text{MHz}$, 调制器的高度应满足驻波条件, 即

$$h = l \cdot \frac{\lambda_s}{2} = q \cdot \frac{f_M}{f_s} \lambda \quad (8)$$

式中, λ_s 为超声波波长; f_s 为超声波频率; λ 为激光波长; l, q 皆为整数。

选择调制器的高度 h 约10mm, 调制器的长度为59mm, 根据激光光斑大小, 取换能器的宽度为2.5mm。

3. 锁模驱动源

由于调制器工作在驻波场状态下, 因而驱动源频率

$$f_{s1} = f_M / 2 = 100\text{MHz} \quad (9)$$

采用100MHz的晶振在恒温槽内工作, 振荡器输出经三级电压放大, 三级功率放大, 保证其工作频率稳定, 输出功率为3W。驱动源与换能器之间的阻抗匹配十分重要, 否则无法将超声源功率加到调制器上。

4. 声光Q开关及其驱动源

为了获得锁模加调Q的激光输出, 需插入声光Q开关, 我们选择了锁模调制器与Q开关分离的器件。声光Q开关由声光介质, 换能器及吸声材料组成。考虑插入损耗小, 透光性能好而选用石英作为声光介质。Y—36°切割LiNbO₃作电声换能器采用布喇格衍射, 行波场方式工作, 以提高衍射效率及脉冲建立时间, 开关器件的长度为76mm, 通光口径为10mm。其驱动源为脉冲调制型高频电源, 工作频率为40MHz, 调制频率1~10kHz, 调制宽度约8~10μs。

5. 主电源

采用负反馈串联调整管电路, 电流稳定度约0.5%。

五、测试结果

1. 单独锁模

微调谐振腔长和AOM的倾斜角, 使示波器上的脉冲图形稳定、脉宽最窄, 这时锁模进入最佳状态。图2是锁模脉冲序列, 其脉冲周期为5ns, 恰好是调制器调制频率的倒数。

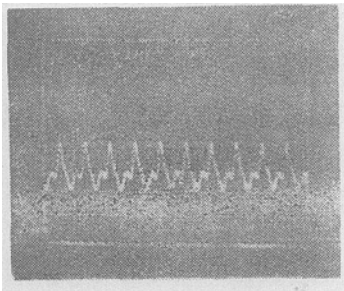


Fig. 2 Mode-locked pulse train

采用二次谐波法 (SHG) 测量锁模脉宽。

图3是所测的自相关曲线。则脉宽

$$\Delta t_M = \frac{2\Delta l}{c\beta\gamma} \quad (10)$$

式中, β 为波型因子, $\gamma = \frac{V_{\text{记}}}{V_{\text{干}}}$ 为修正系数 (

$V_{\text{记}}$ 为X-Y记录仪走纸速度; $V_{\text{干}}$ 为干涉仪动镜扫描速度)。若为高斯型脉冲, 则 $\Delta t_M = 100\text{ps}$ 。

表1是在不同时间测得的锁模激光平均功率。

若取 $\bar{P}_M = 5.2W$, 则峰值功率为

$$P_{p,M} = \frac{\bar{P}_M}{f_M \cdot \Delta t_M} = 260W$$

Table 1 Mode-locked laser average power of different time

time	1990.12.15	1991.5.6	1991.9.12	1991.12.18	1991.12.30
average power (W)	6.7	6.8	5	5.2	6.1

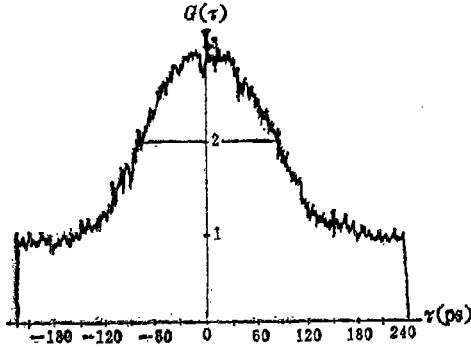


Fig3. Autocorrelation Curve of SHG

$\bar{P}_{M+Q} = 1.4W$ 时, 则由 (6) 式可得峰值功率 $P_{p,M+Q} = 212kW$ 。

在实验中我们发现: 棒在激光器中的位置对锁模脉冲, 尤其是对锁模脉冲的平均功率有

Table 2 Mode-locked, Q-switched average power

time	1991.12.20	1991.12.3
average power	1.18	1.4

很大影响, 对此, 将进行专题研究。

我们研制的高功率YAG锁模/调Q激光器结构紧凑简单, 调节方便。为基础科学的研究和工农医方面的应用提供了一种高能量、高功率的超短脉冲光源。

2. 锁模加调Q

在谐振腔内同时插入调制器AOM及Q开关AOQ, 将谐振腔几何长度粗调到605mm, 即仍然使腔长满足 $L = c/2f_{Ms}$, 获得稳定锁模运转后再启动Q开关驱动源 S_2 , 获得的锁模加调Q脉冲序列如图4所示。其中调Q包络的宽度为220ns。调Q脉冲的周期为1ns, 即频率为1kHz。包络内锁模脉冲的周期仍为5ns。表2是测得的锁模加调Q激光的平均功率。取

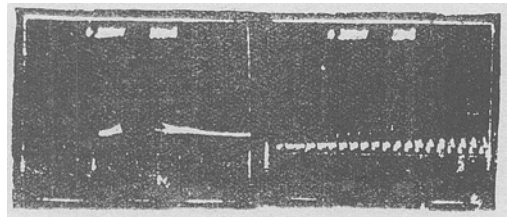


Fig. 4 Mode-locked, Q-switched pulse

参 考 文 献

- [1] Ferray M, Lompre L A, Gobert O *et al.* Opt Commun, 1990; 75 (3~4): 278
- [2] Kuizenga D J. IEEE J Q E, 1981; QE-17 (9): 1694
- [3] Kuizenga D J. Opt Commun, 1986; 22 (2): 48
- [4] Luther-Davies B. Opt Commun, 1986; 57 (5): 340

* * *

作者简介: 刘耀兰, 女, 1940年出生。副教授。现从事激光技术和激光焊接的研究工作。

蓝信炬, 男, 1934年出生。教授。现从事激光技术和激光焊接的研究工作。

陈同生, 男, 1964年出生。硕士。现从事激光技术及其应用的研究工作。

李洪谱, 男, 1962年出生。讲师。现从事光计算机的研究工作。

收稿日期: 1992年6月17日。 收到修改稿日期: 1992年7月13日。