

Nd:YAG 声光瞬态锁模激光器

李士英 陈绍和 谢梓铭
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文介绍的 Nd:YAG 声光锁模激光器,采用声光调制器锁模、部分电光 Q 开关预激光和储能放大。在谐振腔中插入染料盒还可以进行主被动锁模。整个系统的输出性能是:锁模脉冲宽度从 20 ps 到几个 ns 秒范围内可调,单个脉冲能量大于 0.1mJ,脉冲序列幅度的稳定度优于 90%。

一、引 言

在固体锁模激光器中,脉冲光泵的被动锁模激光器^[1]具有最小的脉冲宽度、较大的单个脉冲能量。可是由于它本身固有的输出的不稳定性,使得在某些要求高稳定性的应用中受到限制。连续光泵的稳态主动锁模激光器^[2,3]能提供相当稳定的锁模脉冲序列,但是它的单个脉冲的能量太小,只有几个毫微焦耳。这样小的能量不易直接输入到放大器中去,需要用再生放大的方法来提高单个脉冲的能量。也有人曾企图在连续锁模激光器中,加 Q 开关来提高单个脉冲的能量,但由于重复率 Q 开关的引入,破坏了稳态锁模条件,使之变成瞬态锁模^[4],所以实验结果并不令人满意。它既不能使单个脉冲的能量有多大的提高,又使输出变得不稳定。然而瞬态锁模激光器不稳定性不是它本身固有的,而是加入 Q 开关所引起的。

我们采用的脉冲光泵 Nd:YAG 声光瞬态锁模激光器应用声光调制器锁模,部分电光 Q 开关预激光和储能放大。实验结果表明,它是一种较好的高强度、高稳定的主动锁模激光器,适用于做亚毫微秒激光系统的振荡器。

二、理 论 背 景

稳态主动锁模激光器脉冲宽度的理论值是^[2]:

$$\tau_{\text{稳态}} = \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{\theta_m f_m}} \cdot \sqrt{g^{1/2} / \Delta f}, \quad (1)$$

式中 f_m 为调制器的频率, Δf 为激活介质的谱线宽度, g 为激光在谐振腔中振荡一周的振幅增益, θ_m 为调制器的调制度。

稳态锁模理论认为:主动锁模激光器达到稳态是由两个过程的平衡条件决定的。光脉冲通过调制器将略为被压缩,即(1)式中的 $(1/\theta_m f_m)^{1/2}$ 项。通过激活介质又稍被拉长,即(1)式中的 $(g^{1/2}/\Delta f)^{1/2}$ 项。两者之间的平衡状态决定了稳态锁模的脉冲宽度。在分析稳态

锁模形成的过程中,我们应该注意到:在最初,也就是锁模还没有达到平衡态之前,是前一个过程起作用。这时,谐振腔内建立起的一个均匀光场反复地通过具有透过率为下式

$$f(t) = \cos(\theta_m \sin 2\pi f_m t) \quad (2)$$

的声光损耗调制器,便形成了一个越来越窄的光脉冲包络。若通过调制器的次数为 M 次,那么这个光脉冲包络的宽度为^[4]

$$\tau_{\text{窗}} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \cdot \frac{1}{\pi \theta_m f_m} \cdot \sqrt{\frac{1}{M}} \quad (3)$$

这里,我们称(3)式所给出的脉冲宽度为“窗口宽度”。必须注意,(3)式是不含激活介质参数的,因为现在我们还没有考虑到激活介质的影响。对于一个确定的调制频率(f_m)和调制度(θ_m),显然,(3)式所给出的“窗口宽度”($\tau_{\text{窗}}$)大于(1)式给出的稳态锁模脉冲宽度($\tau_{\text{窗}}$)。要想得到窄的“窗口宽度”,提高调制频率和调制波是有效的,但这在调制器的制作技术上有困难。在实验上控制 M 值是方便的。

这种窗口效应的激光输出脉冲宽度一般是几个毫微秒,并允许有较大的失调度。谐振腔长度的变化量(ΔL)与谐振腔长度 L 之比,约为 10^{-5} 量级。

当 M 值足够大时(象连续锁模),(3)式显然是不合理的。这主要是因为锁模初始阶段脉冲谱线宽度足够地窄,它不受激活介质线宽影响。但当锁模进行一定时间后,脉冲的线宽达到一定的宽度,这时必须考虑激活介质线宽的限制,脉宽不能无限地小下去。考虑到激活介质对脉宽的影响,当脉宽是极限变换脉冲的两倍时, M 值满足下式

$$M \geq \frac{0.5}{g^{1/2} \theta_m} \cdot \frac{\Delta f}{f_m} \quad (4)$$

我们称满足(4)式条件的“窗口宽度”为瞬态锁模脉冲宽度。

对于“窗口宽度”和瞬态锁模两个概念,不只限于解释本文所讨论的锁模激光器,还可以用来解释主、被动锁模激光器中主动调制器的窗口效应,以及连续锁模激光器加 Q 开关后的瞬态效应等。

对于 Nd:YAG 激光器,谱线宽度 $\Delta f = 180 \text{ GHz}$,光调制频率 $f_m = 100 \text{ MHz}$, $\Delta f/f_m = 10^3$ 。那么满足于(4)式的一个光脉冲在谐振腔内振荡的时间是 $10 \mu\text{s}$ 到 $100 \mu\text{s}$ 。在实验上得到稳定的锁模序列时,所需的光脉冲在谐振腔内振荡的时间要大于这个理论估计。采用预激光的方法来增加(4)式中的 M 值是相当有效的。

三、激光系统的描述

脉冲光泵 Nd:YAG 声光瞬态锁模激光器谐振腔的结构如图 1 所示。采用水冷脉冲氙灯光泵,灯尺寸为 $\phi 8 \times 80 \text{ mm}$,氙灯充电精度为 1 V ,单椭圆聚光腔,灯、棒分腔冷却,Nd:YAG 棒的尺寸为 $\phi 5 \times 60 \text{ mm}$,两端面磨成 2° 角度,用浓度为 0.5% 的重铬酸钾溶液冷却,并用超级恒温器进行温度控制。谐振腔内放置的光学元件不是磨成小角度就是按布鲁斯特角位置放置,用以消除内腔标准具效应。全反射镜的曲率半径为 3 m ,输出反射镜为平面楔形镜,透过率为 50% 。谐振腔光学腔长 1.5 m ,组成半共焦谐振腔。若要进行主、被动锁模时,染料盒尽量靠近全反射镜,以布鲁斯特角位置放置。声光调制器尽量靠近输出反

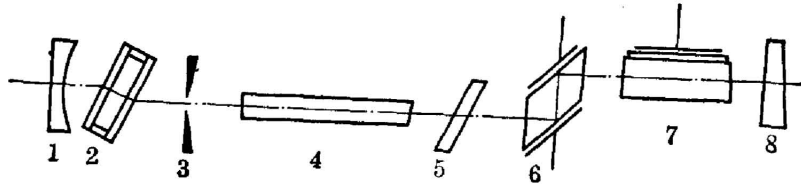


图 1

射镜。部分电光 Q 开关放置在偏振片和声光调制器之间。谐振腔内加入直径为 2.5 毫米的小孔光阑以保证激光器的单横模运转。上述所有元件都架在殷钢光具座上。反射镜架可调精度为微米量级。

1. 声光调制器

具有调制函数(2)式的驻波型声光调制器是用优质熔石英玻璃做声光介质,用 $Y36^\circ$ 切割铌酸锂晶体做电声换能器。频率在 50 MHz 处谐振,调制器声轴频率间隔 500 kHz。声激励源频率 50 MHz, 稳定度 10^{-8} 。调制器有效通光孔径 3 毫米,声光作用距离 18 mm, 1.06μ 最大调制深度 $\theta_m \approx 0.55$ 。在整个锁模过程中,声光调制器是连续打开的。调制器的热效应会使锁模输出的性能变坏,采用水冷电极可以消除在较高调制深度时调制器的热效应。

2. 电光 Q 开关

在一般的 Q 开关激光器中, Q 开关打开时谐振腔内的增益很高,光脉冲建立时间很短。在瞬态锁模激光器中,光脉冲宽度正比于 $1/\sqrt{M}$,窄的脉冲要有长的脉冲建立时间。因此,我们在锁模操作时,主动调制器运转后,引进部分 Q 开关,使谐振腔内保持一个小的净增益,进行预激光。设法延长这个预激周期,也就延长了光脉冲的建立时间。等到光脉冲达到它的峰值之前,再加上完全 Q 开关。这时预激结束,光脉冲将快速达到极大,并从谐振腔中输出。用这种阶跃 Q 开关的方法来进行预激光和储能放大,达到了压缩脉冲宽度和提高单个脉冲能量两个目的。另外,我们还认为在这种方法中,若能够精确控制完全 Q 开关打开的时刻,它又是提高锁模输出稳定性的有效措施。控制精度越高,输出的稳定性越好。但是,若不注意到这一点,就会造成锁模输出的不稳定。对于脉冲间隔为 10 ns 的锁模序列,控制线路的时间精度要求小于 5 ns,就能够做到选取锁模序列中的任何一个脉冲作为完全 Q 开关的控制信号。若每次光泵后都控制在同一个脉冲,相同强度上打开完全 Q 开关,这时显然锁模输出会很稳定。

脉冲光泵锁模序列包络只有几个微秒,用慢速的声光 Q 开关作为部分 Q 开关不合适。它无法满足从控制信号到完全 Q 开关的快速转换。我们选用的电光 Q 开关为双 45° 铌酸锂,尺寸是 $9 \times 9 \times 11$ (mm)。

3. 染料锁模

被动锁模的不足之处是输出不稳定,但它的脉冲之窄是主动锁模不能比拟的。因此要进一步压缩脉冲宽度,可在谐振腔中插入染料盒,进行主、被动锁模。实验结果表明,主、被动锁模引人注目地改变了被动锁模的特性,提高了稳定性,消除了卫星脉冲,阈值变锐,信噪比大大提高。细节将另文发表。

四、锁模脉冲宽度的测量方法

(1) 对于脉冲宽度小于 100 ps 的锁模脉冲, 用双光子荧光法测量。

(2) 对于脉冲宽度大于 1 ns 的锁模脉冲, 用硅 PIN 管或硅 APD 管光电转换, 7904 型示波器显示。

(3) 对于脉冲宽度从 100 ps 到 1 ns 之间的锁模脉冲, 没有条纹相机, 直接测量是困难的。在此, 我们给出了一个估测窗口宽度的方法:

被动锁模激光器的波动理论认为, 在染料的非线性阶段之前, 每个振荡周期充满着强度无规则的尖峰。这时的功率密度是小的。对于主被动锁模, 同样在染料的非线性阶段之前, 染料引起功率密度的变化要小于主动调制器所引起的功率密度的变化。因而在主动调制器的窗口宽度内可能包含着一个或几个尖峰。当染料达到非线性阶段之后, 染料引起功率密度的变化就要大于主动调制器引起功率密度的变化。这时如果在主动调制器的窗口宽度内, 包含一个以上脉冲的话, 必然会形成多脉冲。在锁模形成过程中, 主动调制器的窗口宽度也在变小, 如果小到只能容纳下一个尖峰, 那么锁模输出肯定是单脉冲了。这样, 在主、被动锁模激光器中, 我们不用染料盒和全反射镜一体化。改变染料盒离开全反射镜的距离 l , 当出现卫星脉冲时, 染料盒的位置是窗口宽度的一种近似量度, 即窗口宽度是

$$\tau_{\text{窗口}} \approx \frac{2l}{c}。$$

测量时从大到小连续变化距离 l , 直到用双光子荧光仪观察不到卫星脉冲为止。

在被动锁模中, 达到染料非线性起始点的功率密度为 10^5 W/cm^2 时, 所需脉冲在谐振腔中振荡次数小于瞬态锁模脉冲形成要求的脉冲振荡次数。因此用这种方法测出的窗口宽度小于实际的瞬态锁模脉冲宽度。

五、实验结果

1. “窗口”输出脉冲序列的观测

声光调制器的调制深度 $\theta_m = 0.41$ 。用快速雪崩二极管接收, 用 7904 示波器和 519 示波器显示。在扫描速度为 100 ns/cm 时, 观察脉冲序列波型, 如图 2 所示。在扫描速度为 5 ns/cm 时, 观察单个脉冲波型, 如图 3 所示。单个脉冲宽度小于 1 ns。因为受到测试设备响应时间的局限, 示波图形不能表明脉冲的真实宽度。用我们提出的测量窗口宽度的方法, 测得窗口宽度约 200 ps, 用精密卡计测得单个脉冲能量约为 $10 \mu\text{J}$ 。

当调制深度减小到 0.25 时, 观察到的脉冲波型接近于正弦波, 脉冲的幅度也不锐。

实验结果表明, 象这样的“窗口”输出脉冲序列, 调制深度足够大也可以得到窄的脉冲, 但稳定性一般说来不会太好。调制深度减小, 脉宽变宽。

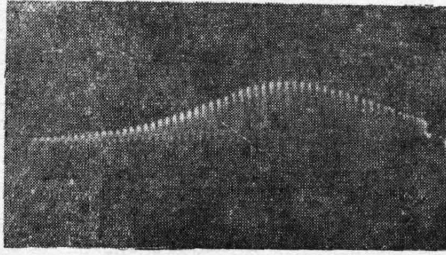


图2 瞬态声光锁模脉冲序列照片
示波器扫描速度为 100 ns/cm

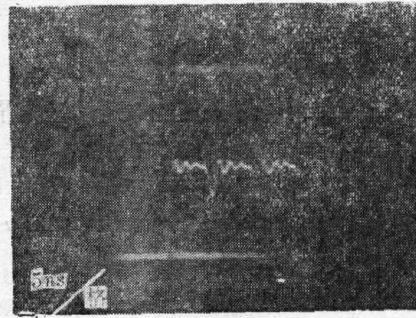


图3 瞬态声光锁模脉冲照片
示波器扫描速度为 5 ns/cm [注: 每个单脉冲后面的振荡是由接收器和示波器阻抗不匹配引起]

2. 瞬态锁模

引进部分 Q 开关进行预激光。预激光周期大于 $150 \mu\text{s}$ 。完全 Q 开关打开后, 瞬态锁模脉冲序列的个数减少, 脉冲幅度增加。测得单个脉冲能量提高到大于 $100 \mu\text{J}$, 比原来“窗口”输出时提高一个量级, 而且脉冲输出的稳定性得到改善。在相同的实验条件下, 连续拍摄 30 张脉冲序列波形, 接收器处于非饱和状态, 观察不出每张之间的幅度差。我们确认每次脉冲序列的峰值起伏小于 $\pm 5\%$, 或者说, 脉冲输出的稳定度优于 90%。

3. 主、被动锁模

主、被动锁模时, 染料盒放在 $l=2\text{cm}$ 位置, 无卫星脉冲, 脉冲宽度 20ps , 如图 4 所示。当 $l=3\text{cm}$ 时, 观察到了卫星脉冲, 如图 5 所示。“窗口宽度”约为 200ps 。



图4 主、被动锁模单脉冲双光子荧光照片

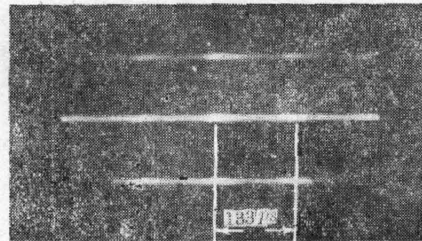


图5 主、被动锁模双脉冲双光子荧光照片
主脉冲和副脉冲之间的距离为调制器的窗口宽度

参 考 文 献

- [1] D. G. Kryukov, V. S. Letokhov; *IEEE J. Q. E.*, 1972, **QE-8**, No. 10 (Oct), 766~782.
- [2] D. J. Kuizenga, A. E. Siegman; *IEEE J. Q. E.*, 1970, **QE-6**, No. 11 (Nov), 694.
- [3] J. H. Wodington; *E-O Laser International* 76 UK, 12~25.
- [4] D. J. Kuizenga *et al.*; *Opt. Commun.*, 1973, **9**, No. 3 (Nov), 221.

A transient acousto-optically mode-locked Nd:YAG laser

LI SHIYING CHEN SHAOHE AND XIF ZIMING

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

(Received 11 November, 1980)

Abstract

An acousto-optically mode-locked Nd:YAG laser, prelasered with an electro-optic Q-switch, energy storage amplified, and modulated with an acousto-optic modulator operated at 50 MHz is described. In the case of embedding a dye-cell into the cavity, the mode-locked laser can be operated either actively or passively. The performance of this laser is as follows: the pulse width varying continuously from 20 ps to several ns, energy of a single pulse greater than 0.1 mJ, and the amplitude stability of the pulse train better than 90%.