

# 被动锁模的石榴石激光器

陈绍和 陈兰荣 林康春 谢梓铭

(中国科学院上海光机所)

## 提 要

研究了石榴石激光器中超短脉冲的形成, 染料的吸收系数  $\alpha_0$ 、染料的饱和功率  $I_s$ 、激光介质中的光束横截面积与染料中的光束横截面积比  $A$  对被动锁模过程的影响。研究的激光在 1.06 微米产生带宽极限的脉冲, 光谱分布和时间分布都是高斯函数, 单个脉冲的宽度可调, 从 20 微微秒到 200 微微秒。

## A passive mode-locked YAG laser

*Chen Shaohé Chen Lanyong*

*Lín Kangchūn Xié Zhīmíng*

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

## Abstract

An investigation was made of the formation of ultrashort pulse trains in an YAG laser, and the effects on the passive mode locking process of the initial dye absorption coefficient  $\alpha_0$ , the saturable power of the dye solution  $I_s$ , and the ratio of the beam cross section in the laser medium to the beam cross section in the absorber. The laser under investigation produces bandwidth-limited output pulses at  $1.06\mu\text{m}$ , with spectral profile and temporal profile in Gaussian function. Single pulses can be adjusted from 20ps to 200ps.

## 一、被动锁模过程分析

关于脉冲被动锁模的理论, Letokhov<sup>[1]</sup> 早已详细介绍了。在这篇文章中, 我们着重分析染料的浓度、饱和功率和光束横截面积比在被动锁模过程中的作用。

光泵开始后, 激活粒子激发到高能态, 产

生自发辐射。当腔中增益等于损耗时, 振荡形成。由于大量轴模的干涉, 腔中辐射场出现了强的波动, 随着振荡次数的增加, 这些辐射场的强度逐渐增强, 并获得了周期结构, 但仍保持它的噪声特性。由于工作物质的增益色散效应, 各个尖峰的频谱宽度逐渐变窄, 这段时间称为线性放大阶段。在线性放大阶段

收稿日期: 1979年1月18日。

结束时,脉冲的频谱宽度将压缩几十倍,在一个振荡周期中( $\frac{2\nu}{c}$ ),充满了  $M$  个强度随机分布的尖峰脉冲。当腔内平均功率密度  $\bar{I}$  达到  $\bar{I} \approx 2 \times 10^{-3} I_s$  时 ( $I_s$  表示染料的饱和功率),非线性阶段开始了,这时激光器的单程增益系数  $\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha = \alpha_0 + r + \Delta\alpha$  ( $\alpha_0 = -\ln T_0$ ,  $r = -\ln \sqrt{R_1 R_2}$ ,  $T_0$  表示弱光情况下染料的透过率,  $R_1$  和  $R_2$  分别表示腔的反射系数,  $\Delta\alpha$  称为净增益)。由于  $\Delta\alpha > 0$ ,所有脉冲都以不同速度增长,随着振荡次数的增加,  $\alpha$  不断减小。当振荡一定次数后,对不同强度的脉冲将出现

$$\alpha_k - \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I_i}{I_s}} - r \leq 0 \quad \text{三种情况,}$$

$$\text{令 } \alpha_k - \frac{\alpha_0}{1 + \frac{P}{I_s}} - r = 0, \quad k \text{ 表示非线性}$$

性阶段开始后的振荡次数。

$$P = I_s \left( \frac{\alpha_0}{\alpha_k - r} - 1 \right) \quad (1)$$

$P$  称为临界强度。

在最大脉冲强度  $\ll I_s$  时,上式写成

$$P \approx \frac{I_s}{\alpha_0} \left( \frac{1}{I_m} \sum_{i=1}^k \bar{I}_i \alpha_i - \Delta\alpha \right) \quad (2)$$

$\bar{I}_i$  表示第  $i$  次振荡时通过工作物质的腔内脉冲的平均强度,  $I_m = \frac{h\nu}{2\sigma T}$ ,  $\sigma$  表示工作物质的受激发射截面,  $T = \frac{2L}{c}$ 。

从(1)看出,随着  $k$  的增加,  $\alpha_k$  不断减小,  $P$  不断变大,而且  $P$  的增长与  $I_s$ 、 $\alpha_0$ 、 $\bar{I}$  及  $\Delta\alpha$  直接有关。

另一方面,不同强度的脉冲在通过染料时有不同的损耗,因而增长速度不一样。一个强度为  $I$  的脉冲通过染料的吸收系数比低强度(弱光)脉冲通过染料的吸收系数( $\alpha_0$ )减少  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\alpha = \frac{I}{I_s} \alpha_0$ , 振荡一次后由于吸收系数的减少强度增长到  $I'$ ,

$$I' = I + \frac{\alpha}{I_s} I^2 \quad (3)$$

强度的净增长  $\Delta I = (I' - I) = \frac{\alpha}{I_s} I^2$ , 由于  $\alpha$  和  $\alpha_0$  成正比,故

$$\Delta I \approx \frac{\alpha_0}{I_s} I^2 \quad (4)$$

可以看出:在非线性阶段开始后,一方面不同强度的脉冲分别以不同速度增长;另一方面,临界强度  $P$  也迅速增长。如果一个脉冲的强度小于临界强度,则开始衰减;如果大于临界强度,它将继续增强。可能出现三种情况:(1)临界强度增长太快,即使最大脉冲,在强度小于  $I_s$  之前也开始衰减(小于临界强度),最终没有高功率锁模脉冲输出。(2)临界强度增长太慢,除最大脉冲外,其它强度较大的脉冲在强度达到  $I_s$  之后,临界强度仍小于  $I_s$ , 这种情况下输出的锁模脉冲不是单列脉冲,而是多列脉冲,信噪比低。(3)临界强度以适当速度增长,在最大脉冲强度  $\ll I_s$  之前,除它外,所有其它脉冲强度小于临界强度,而最大脉冲强度大于临界强度,这样保证了最大脉冲继续增强放大,最终形成高功率巨脉冲输出。为了获得这种最佳锁模条件,必需适当控制临界强度和最大脉冲的增长速度。

对被动锁模激光器,当工作物质、腔长、光泵的发光时间、锁模染料和它的浓度、腔的耦合系数等选定以后,  $\Delta\alpha$  被确定,而且

$$\Delta\alpha = \left\{ \frac{4L(\alpha_0 + r)}{ct_{\text{输}}} \ln \left[ \frac{0.002I_s}{B(\alpha_0 + r)} \right] \right\}^{1/2} \quad (5)$$

对石榴石:  $B \approx 1.5 \times 10^{-4}$  瓦/厘米<sup>2</sup>; 对钕玻璃:  $B \approx 1.7 \times 10^{-3}$  瓦/厘米<sup>2</sup>,  $t_{\text{输}}$  表示由零到峰值的氙灯发光时间。

从公式(2)、(4)、(5)看出,当  $\alpha_0$  和  $\Delta\alpha$  确定后,临界强度的增长速度由  $\bar{I}$  确定,而且临界强度的增长与  $\bar{I}$  成正比,单个脉冲强度的净增长与  $I^2$  成正比。在实验中我们可以改变光束通过工作物质和染料的横截面积来改变  $I$  和  $\bar{I}$  之间的关系,也就是调整临界

强度和最大脉冲强度增长的关系。假定

$$A = \frac{\text{光束通过工作物质的横截面积}}{\text{光束通过染料的横截面积}}$$

当选择  $A > 1$ , 降低  $\bar{I}$ , 也就是降低临界强度的增长速度;  $A < 1$ , 加快了临界强度的增长速度。也就是说, 对于给定的  $x_0$  和  $\Delta\alpha$ , 有一个最佳横截面积比  $A_{最佳}$  与它们对应, 满足最佳锁模条件; 或者说, 对任一横截面积比  $A$ , 有一个最佳的  $\Delta\alpha_{最佳}$  和  $x_0$  与它对应, 满足最佳锁模条件。即有一组  $x_0, r, I_s, t_{峰}, L, I_m$  与它对应, 满足最佳锁模条件, 而且在这一组物理参数中,  $x_0$  和  $I_s$  改变最灵敏, 因为它们分别与  $P$  和  $\Delta I$  成正比和反比。

假如  $\Delta\alpha > \Delta\alpha_{最佳}$ , 从公式(2)看出, 意味着  $P$  变小, 就是上面分析的第二种情况, 这时输出锁模脉冲信噪比下降。当  $\Delta\alpha < \Delta\alpha_{最佳}$ , 就是上面分析的第一种情况。

总之, 对于被动锁模激光器, 当腔和工作物质在腔中位置确定后 ( $A$  确定), 有一组确定的物理参数  $x_0, I_s, r, L, t_{峰}, I_m$  与它对应, 满足最佳锁模条件, 如果不满足, 输出锁模脉冲信噪比降低或输出锁模脉冲几率减小。我们利用[2]给出的方程计算  $\Delta\alpha_{最佳}$  和  $A_{最佳}$  的关系, 如图 1。计算条件  $\sigma = 8.8 \times 10^{-19}$  / 厘米<sup>2</sup> (对石榴石),  $L = 1.5$  米, 五甲川染料,  $I_s = 4.2 \times 10^7$  瓦 / 厘米<sup>2</sup>,  $T_0 = 0.5$ ,  $R_1 = 100\%$ ,

$R_2 = 50\%$ 。将上述数据代入公式(5), 取  $t_{峰} = 150$  微秒, 算出  $\Delta\alpha = 3.85\%$ , 从图 1 找出, 当  $\Delta\alpha_{最佳} = 3.85\%$ ,  $A_{最佳} = 1.52$  时可得到最佳锁模。

## 二、被动锁模实验

激光器的谐振腔为腔长 1.5 米的半共焦腔, 腔镜固定在四根殷钢构成的 H 形支架上。全反射镜和输出镜均为  $\phi 30 \times 4$  的楔形板(两面夹角  $\sim 3^\circ$ ), 工作物质是一根  $\phi 6 \times 90$  毫米的优质石榴石棒(两端面均磨成布儒斯特角), 重铬酸钾溶液冷却。光泵是两支  $\phi 4 \times 70$  毫米的脉冲氙灯, 染料盒与全反射镜结合一体, 槽厚 1 毫米, 窗口是楔形板。腔内紧靠全反射镜处加一个  $\phi 2.6$  小孔限制横模, 器件恒温在  $20^\circ \pm 1^\circ\text{C}$  工作。激光器阈值(不加染料) 7.6 焦耳, 加小孔后 8.8 焦耳, 输出腔片的反射率  $R \approx 50\%$ 。激光器结构如图 2。

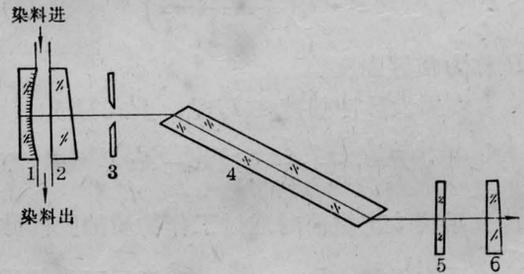


图 2 激光器结构图

- 1—全反射镜; 2—染料盒; 3—小孔; 4—石榴石棒;  
5—F-P 标准具; 6—输出腔片

在本实验中, 我们通过测量锁模脉冲光谱分布是否光滑<sup>[4]</sup>, 锁模脉冲时间宽度是否达到带宽极限 ( $\Delta\nu \Delta t = k_{带}$ , 对高斯分布,  $k_{带} = 0.44$ ) 和双光子荧光对照比三个方面来判断锁模质量的优劣。由于石榴石激光器在一般情况下发射光谱宽度  $< 1$  埃, 在实验中采用具有高分辨率的 F-P 标准具测量锁模脉冲的发射光谱强度分布和宽度, 测量装置采用文献[5]的结构。测量锁模脉冲的时间宽度和对照比的双光子荧光结构采用文献[6]

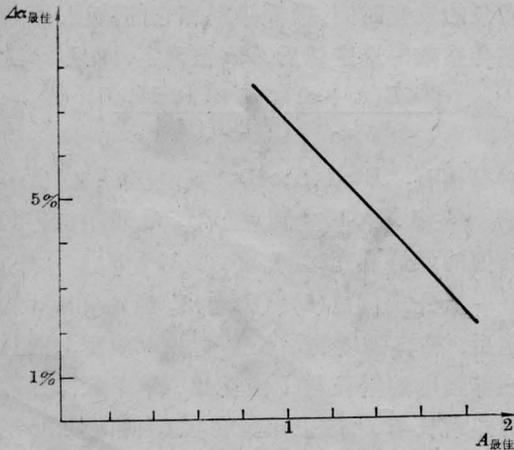


图 1 用五甲川染料进行被动锁模的石榴石激光器中  $\Delta\alpha_{最佳}$  和  $A_{最佳}$  的关系

介绍的装置。脉冲宽度  $t_p = \frac{n\Delta l}{\gamma^* c}$  s

$s$ ——照相机的缩小倍数； $n$ ——荧光染料溶液的折射率； $\gamma^*$ ——与脉冲形状有关的因子，对高斯脉冲， $\gamma^* = 1.41$ ； $c$ 表示真空中光速。上式中的  $\gamma^*$  因子，我们通过测量光谱强度分布来确定。比如，如果光谱是高斯分布， $I(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{W}\right]$ ，则时间分布也是高斯分布<sup>[4]</sup>，

$$I(t) = W \exp[-W(t - t_0)^2]$$

另外，我们也采用了同轴强流光电管和示波器（频率 1000 兆周）测量锁模脉冲的时间特性，观察脉冲是否是间距为  $2L/c$  的规则脉冲，同轴强流光电管的响应时间  $\sim 1$  毫微秒。

我们用五甲川染料和十一甲川染料进行了锁模实验。激光器稳定地实现了单横模运转，单横模近场空间强度分布分别见图 3 和照片 1。

当用五甲川染料进行锁模实验时，染料浓度  $T_0 = 52\%$ ， $A = 1.6$ ，用示波器连续 20 次拍摄系列脉冲波形，约有 80% 几率波形稳定，幅度没有明显变化，脉冲系列波形见照片

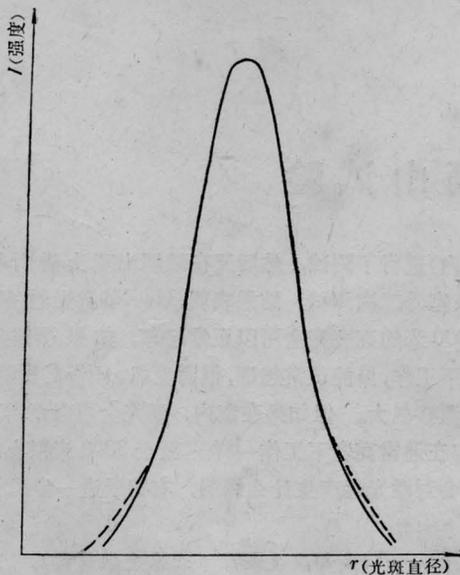
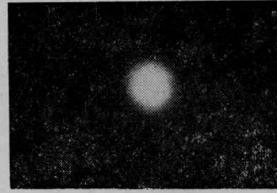
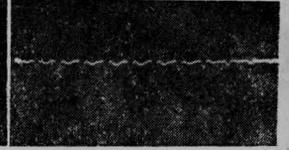


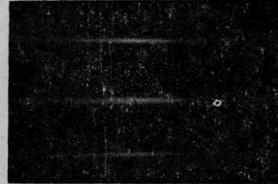
图 3 激光器输出的  $TEM_{00}$  模的空间强度分布  
实线——理论高斯曲线；虚线——实际测量曲线



照片 1  $TEM_{00}$  模



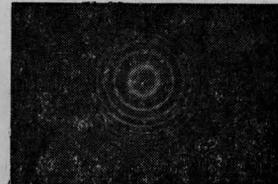
照片 2 间距等于  $\frac{2L}{c} = 10$   
毫微秒的系列脉冲  
(示波器扫描速度 20  
毫微秒/厘米)



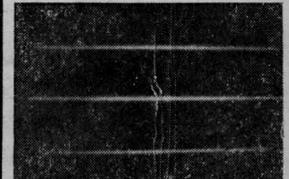
照片 3 锁模脉冲的  
宽度  $\sim 20$  微微秒  
(白线全长对应 300 微微秒)



照片 4 锁模脉冲的宽度  
100 微微秒  
(白线全长对应 300  
微微秒)



照片 5 F-P 标准  
具干涉图  
标准具间距  $d = 5.4$  毫米  
发射光谱宽 0.17 埃，光谱强  
度分布光滑



照片 6 锁模脉冲  
宽度 200 微微秒  
(白线全长对应 300 微微秒)

2。脉冲宽度  $\sim 20$  微微秒，见照片 3。腔内插入厚 2 毫米 ( $R = 25\%$ ) 的标准具时，脉冲加宽到  $\sim 100$  微微秒，见照片 4，发射光谱宽度  $\sim 0.16$  埃，见照片 5，其中有 70% 几率的系列脉冲  $\Delta\nu \Delta t \approx 0.44$ ，双光子荧光对比  $\sim 3$ ，发射光谱的强度分布是光滑的高斯分布。从前面分析知道，它的时间分布也是高斯分布，因此，在这种情况下有 70% 几率达到空间、时间、频率均为高斯分布。腔内插入厚 4 毫米的标准具 ( $R = 25\%$ ) 时，脉冲宽度  $\sim 200$  微微秒，见照片 6。

当染料浓度下降到  $T_0 = 62\%$  时，发射锁模脉冲几率  $\sim 50\%$ 。用十一甲川染料进行锁模时， $T_0 = 52\%$ ， $A = 1$ ，输出锁模脉冲强度

很弱。当  $A$  从  $A=1$  减小到  $A=0.5$  时, 输出锁模脉冲强度增强, 约有 60% 几率双光子荧光对照比  $\geq 2.5$ ,  $\Delta\nu\Delta t \approx 0.6 \pm 0.1$ , 示波器观察锁模脉冲幅度起伏变化较大。

## 实验结果讨论

对于脉冲被动锁模, 在线性阶段结束时,  $M$  个脉冲的强度是几率分布的。因此, 最大脉冲的强度也是几率分布的。例如, 一个强度为  $y$  (对平均强度归一化) 的脉冲, 它是最大脉冲的几率  $P(y)^{[2]}$ ,

$$P(y) = me^{-y}[1 - e^{-y}]^{m-1} \quad (6)$$

所以被动锁模激光器中输出锁模脉冲的质量也是几率分布的, 假定最大脉冲的最大可能值即  $y_{\max} = \ln M^{[2]}$  满足最佳锁模条件, 这种情况称为最佳锁模。这时输出最佳锁模的几率  $\sim 70\%$  (假定  $M=100^{[3]}$ ,  $y = \ln M$  是最大脉冲和次大脉冲的几率  $\approx 70\%$ )。从我们的实验看出, 对五甲川染料, 当  $T_0=0.52$ ,  $A=1.6$  时, 基本上实现了最佳锁模和前面的计算  $A_{\text{最佳}}=1.52$  基本一致。当  $T_0=62\%$ ,  $A=$

1.6, 这时  $\Delta\alpha < \Delta\alpha_{\text{最佳}}$ , 从公式(2)、(4)看出, 临界强度增长太快, 必须是强度大于  $\ln M$  的脉冲是最大脉冲才可能最终形成高功率锁模脉冲输出。从公式(6)看出, 出现这种脉冲的几率减小, 故输出锁模脉冲减少为 50% 左右。对于十一甲川染料, 由于  $I_s$  较小,  $P$  增长慢, 强度小于  $\ln M$  的脉冲也可能形成高功率的锁模脉冲输出, 故输出锁模脉冲信噪比降低, 双光子荧光对照比也减小。总之, 从我们的实验结果看出, 我们的分析和计算基本上是正确的。

## 参 考 文 献

- [1] V. S. Letokhov; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1972, **QE-8**, 766~782.
- [2] W. H. Glenn; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, **QE-11**, 8~17.
- [3] M. S. Demokan; *INT J. Electronics*, 1976, **41**, No. 5, 421~470.
- [4] D. J. Bradley; *Proc. IEEE*, 1974, **62**, 313~345.
- [5] 《激光参数测量》编写组, 《激光参数测量》, 上海人民出版社, 1976. 6.
- [6] D. Vonder Linde; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1972, **QE-8**, 328~338.

## 札 记

# He-Ne 激光器高山试验

1978 年底在广州召开的 He-Ne 激光器测试大会上, 有人提出海拔高度对 He-Ne 激光器的使用有没有影响及影响到底有多大的问题。为此目的, 我们遵照有关领导单位的意见, 组成“He-Ne 激光器高山试验小组”, 在四川峨嵋山顶进行了高山试验工作。

试验用的激光器有二台: 成都温度表厂制的腔长 400 毫米的内腔同轴式 He-Ne 激光器和北京光学仪器厂制的腔长 350 毫米的内腔同轴式 He-Ne 激光器。

为了对比, 我们先在一般高度下(即在成都温度

表厂内)进行了测试, 然后又在峨嵋山顶上进行了室内、室外二次测试。结果表明, He-Ne 激光器在海拔 3000 米的高度完全可以正常起辉。如果裸露在大气下工作, 虽能正常起辉, 但因受风、雨等的影响, 功率漂移很大。但如果在室内, 则完全可以正常工作, 与在通常高度下工作一样。至于 3000 米以上的高度会对激光器产生什么影响, 有待于进一步的试验。

(成都温度表厂 北京光学仪器厂  
高山试验小组 金耀章 执笔)