

对撞脉冲锁模激光器若干问题的探讨

吴逢铁 张文珍 林 星

(应用物理系)

摘 要

本文从理论上分析了抗共振环及其元件在对撞脉冲锁模激光器中的作用。实验研究和理论说明了光泵能量及可饱和吸收体浓度对锁模超短光脉冲输出特性的影响。

引 言

随着激光在物理、化学、生物中日益深入和广泛的应用，超短光脉冲技术已经逐渐成为研究物质微观世界超快过程不可缺少的手段。因此压缩激光脉冲宽度一直是激光领域中一个相当重要的研究方向。81年，美国贝尔实验室的 Fork 等人首次在染料激光器中实现了对撞脉冲锁模^[1] (Colliding Pulse Mode-locking 简称 CPM)，从而建立了一种新的锁模机理，并使得光脉冲宽度进入了毫微微秒(Femtosecond, 即 10^{-15} 秒)领域。去年贝尔实验室报导已获得 8fs 的激光脉冲^[2]，这个仅为 4 个光周的光脉冲已十分接近光频振荡周期的极限脉冲，是目前得到的最短光脉冲。它是把来自 CPM 基本系统的光脉冲通过光纤进行光谱展宽，然后将这些脉冲在一对光栅间来回反射加于压缩而获得。由于对撞脉冲锁模不仅在激光脉冲宽度上是一次突破，而且在其工作稳定性和输出功率方面也有所突破，所以目前国内外对这一课题的研究异常活跃，国内近阶段也报导了这方面的研究工作^[3, 4]。本文从理论上分析抗共振环在对撞脉冲锁模激光器中的作用，对其中的重要元件——抗共振环的分束镜进行探讨、选择，并通过 Nd: YAG 对撞脉冲锁模激光器的实验研究，得出光泵能量及可饱和吸收染料浓度对锁模超短光脉冲输出特性的影响。

二、CPM腔中抗共振环的作用及元件的选择

1. 压缩脉宽，提高稳定性

带抗共振环的对撞脉冲锁模机理：由分束镜 M 分成相反方向运行的两光脉冲在可饱和

本文1986年6月6日收到。

吸收体处相撞，由于两脉冲相干作用，在可饱和吸收介质处形成光强的空间调制，因而造成可饱和吸收介质上下能级粒子数的空间周期分布，形成了瞬态粒子数分布光栅，这一光栅非常有效地同步、稳定，且压缩了在两个方向上传播的脉冲^[5]，脉冲压缩速度较一般被动锁模快 7—8 倍，这也等效于可饱和吸收介质的横向吸收截面增大了 3 倍，因此它能获得比普通被动锁模窄得多的脉冲。

下面方程给出了可饱和吸收体中瞬态粒子数分布光栅的数学表达式^[6]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_R}{dt} \Big|_{x-ct} &= -\frac{\sigma N_A}{2} E_R + \frac{\sigma N_B}{4} E_L \\ \frac{dE_L}{dt} \Big|_{x-ct} &= -\frac{\sigma N_A}{2} E_L + \frac{\sigma N_B}{4} E_R \\ \frac{dN_A}{dt} \Big|_{x-ct} &= -\frac{\sigma N_A}{2} (E_R^2 + E_L^2) + \frac{\sigma N_B}{2} E_R E_L \\ \frac{dN_B}{dt} \Big|_{x-ct} &= \sigma N_A E_R E_L - \frac{\sigma N_B}{2} (E_R^2 + E_L^2) \end{aligned} \right\} (1)$$

方程中 E_R 和 E_L 分别为自左、右两侧通过可饱和吸收体的场强， N_A 和 N_B 分别表示瞬态光栅的平均分量和基波分量的粒子数密度， σ 为可饱和吸收体吸收截面。方程推导过程，略去了二次谐波分量。方程组(1)也就是当两相向传播的光脉冲在可饱和吸收体内对撞，形成粒子数分布的瞬态光栅的包迹耦合波方程。由方程组(1)可得出粒子数分布光栅的数值计算结果，并由图 1 直观地表示出来，图 1 也就是当两个相向传播的超短光脉冲通过可饱和吸收体时的行为。(a)—(f)依脉冲通过的时间顺序。

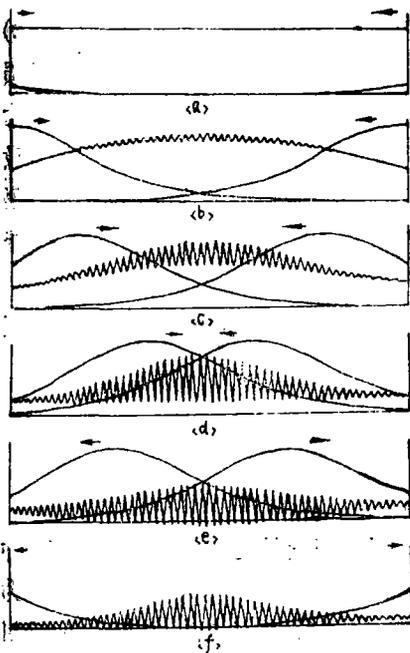


图 1 饱和吸收体内瞬态光栅建立过程

由图 1 可见，该光栅的形成是靠脉冲前沿能量被吸收造成的。从损耗能量的角度来看，它和普通被动锁模过程的前沿被压缩是等效的，但由于“光栅”的建立比普通单个脉冲通过可饱和吸收体达到饱和状态要快，因此，它允许光脉冲中间部分有较多的能量通过。且脉冲后沿通过可饱和吸收介质时，“光栅”的调制度仍然很大，因此后沿经受了较大的后向散射，即后沿经受了额外的压缩。

理论计算证明，对撞脉冲锁模激光器可以获得比普通被动锁模窄 3—4 倍的锁模脉冲。在实验中我们验证了这一理论，原来脉宽为 30ps 左右的普通被动锁模脉冲，改为 CPM 腔后，其脉宽变为 10ps 左右，压缩了 3 倍。

理论计算还表明，对撞脉冲锁模的稳定性比普通被动锁模稳定性要高，稳定的工作区要宽。在我们的实验中，原来普通的 Nd:YAG 被动锁模激光器

输出的锁模脉冲几率为 90%，而改制的 CPM 激光器输出的锁模脉冲几率为 100%。且输出的单

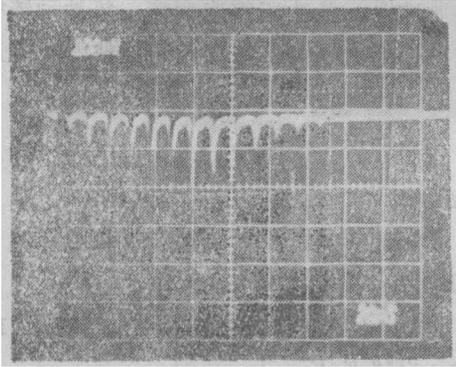


图 2 锁模单脉冲序列图
(100mv/格, 20ns/格)

脉冲序列的能量和形状都具有相当高的稳定性。图 2 是通过几十次曝光从 500MHz 示波器拍下的锁模单脉冲序列图照片, 由图片可见 CPM 腔大大地提高了锁模的稳定性。

2. 抗共振环的膜片选择

由于抗共振环在 CPM 腔中起着相当重要的作用, 所以对其元件的选择也就十分的重要。现在对 M 镜的选择作一简单的计算和分析。当入射光波从干涉仪的 A 臂入射到分束镜 M 上, 分成两束(设夹角为 α), 以相反方向在环中运行, 在可饱和吸收介质处对撞后又回到 M 镜。设 M 镜的透过率为 T, 反射率为 R, 忽略吸收和其它损耗, 则有 $R + T = 1$ 。选取 M_2 、 M_3 对入射角为 $\frac{180^\circ - \alpha}{4}$ 且对此光波无损耗的全反镜。当抗共振

环中不存在染料盒时, 返回 A 臂的反射波与透射波相位总是相等($\beta = 0$, $\cos \beta = 1$) 两光波相干迭加, 则抗共振环对 A 臂原入射光波的反射率为

$$RT + RT + 2\sqrt{RT \times RT} \times \cos \beta = 4RT \quad (2)$$

而对 B 臂来说, 由于反射波与透射波的相位总是相差 π ($\beta = \pi$, $\cos \beta = -1$), 则耦合到 B 臂的耦合率为

$$T^2 + R^2 + 2\sqrt{T^2 \times R^2} \cos \beta = (T - R)^2 \quad (3)$$

由等式(2)、(3)可知, 若我们选择 M 镜, 使其透过率等于反射率($T = R = 50\%$), 忽略其它损耗, 则 $4RT = 1$, $(T - R)^2 = 0$ 。即入射光波全部反射回原入射臂, 耦合到另一臂的能量为零, 抗共振环等效于一个全反镜, 此时输出能量最大。如 $R \neq T$, B 臂有耦合输出, 这时激光腔的损耗增大。此外, 若环中存在某些非光学对称元件, 会破坏腔内的横模分布, 激光器难以获得单模运转, 此时, 当环内有可饱和吸收体时, 强度不等的两个脉冲产生的瞬态光栅效应减弱, 影响了锁模的效果和质量。

此外, 染料盒在环中置放的角度、位置及染料溶液有效厚度等其它因素对输出能量和锁模效果的影响, 在有关文章中已有叙述, 这里不再进行讨论。

三、输出特性的实验探讨

由于超短光脉冲的许多应用需要单脉冲, 所以, 研究哪些因素的变化会引起锁模多脉冲的出现是很有必要的。为此我们进行了这方面的实验探讨, 实验装置如图 3 所示。激光器为我们自己改制的掺钕钇铝石榴石($Nd: YAG$)对撞脉冲锁模激光器, 可饱和吸收体为五甲川十 1.2-二氯乙烷(激光纯), 其它参数同文献[7], 激光由 M_4 耦合输出。一般输出脉宽 10Ps 左右(脉宽由 SMJ-2 型双光子荧光脉宽测量仪测定)。耦合输出通过 PIN 光二极管接收由 500MHz 宽带示波器观察输出的锁模脉冲波形。激光器电源的贮能电容为 100 μ f。

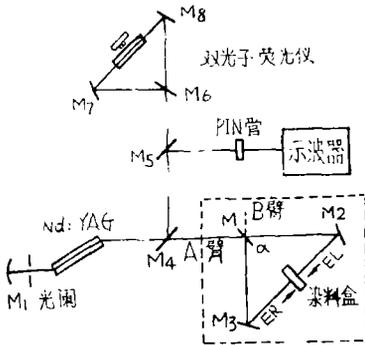


图3 实验装置

1. 输入泵浦能量的影响

在一定的染料浓度下(用染料透过率表示), 逐渐改变输入泵浦能量来研究输出特性的变化, 寻找获得单脉冲运转的条件. 实验中我们发现, 对一定浓度的染料, 在激光阈值上逐渐增加输入泵浦能量激光输出将由单脉冲转变为双脉冲及多脉冲. 实验结果列于表1.

现在从理论上对这一实验现象进行分析.

我们使用的可饱和染料(五甲川十1.2-二氯乙

表1 输入泵浦能量对输出特性的影响

| 泵浦能量(J) 染料透过率(T ₀) | 输出特性 | 单脉冲 | 双、多脉冲 |
|-----------------------------------|------|-------|-------|
| 72% | | 45—50 | ≥52 |
| 66% | | 46—52 | ≥55 |
| 60% | | 46—58 | ≥61 |
| 55% | | 47—58 | ≥61 |
| 50% | | 46—58 | ≥61 |
| 46% | | 50—70 | ≥72 |
| 40% | | 51—74 | ≥76 |

烷)对1.06μm的光有强烈的吸收, 且随入射光的增强, 吸收系数减小. 吸收系数与光强的关系为

$$\alpha = \alpha_0 \frac{1}{1 + \frac{I}{I_s}} \tag{4}$$

其中, α 是光强为 I 时的吸收系数; α_0 为光强趋于零时的吸收系数; I_s 称为饱和参量, 是吸收系数减小到 $\alpha_0/2$ 时的光强. 当光强远大于 I_s 时, α 趋于零, 吸收趋于饱和, 这时染料有强烈的非线性效应, 强的光脉冲可通过吸收体, 而较小的被吸收、抑制掉.

以“起伏模型”为基础, 从被动锁模的时域理论出发. 当激光器开始泵浦, 腔内产生了大量随机起伏的噪声脉冲, 其强度大小不一, 但开始饱和吸收体处于线性吸收阶段, 对不同强度的脉冲的吸收是一样的. 当腔内光强逐渐增大超过饱和光强时, 染料的吸收变为非线性. 在染料的非线性吸收阶段中, 若脉冲强度超过一定值 I_n , 则这一脉冲可通过吸收体, 并在腔内来回振荡而迅速增大, 而大量的较小脉冲受到染料较大的吸收而被有效的抑制, 激光器输出一个高强度的脉冲序列.

我们的实验中, 对一定浓度的染料(I_n 值一定), 使光泵在阈值以上的一定范围内工作, 当

染料处于非线性吸收阶段, 这时, 如果在时间宽度 $2L/c$ 内(以下的讨论均在相同的时间范围内), 起伏的噪声脉冲中仅有一个脉冲强度超过 I_n 值(如图 4 (a)所示), 则只有这个脉冲可通

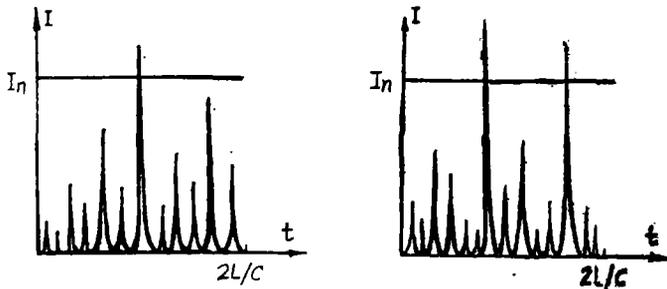


图 4 $2L/C$ 中噪声脉冲强度与 I_n 值的关系

过饱和吸收体, 并受增益介质的放大而迅速增大, 而其它较小的脉冲受到染料较大的吸收而被抑制, 其结果激光输出为单脉冲。但是当输入泵浦能量达到一定值时, 噪声脉冲群里如有两个或多个脉冲强度超过 I_n 值。(如图 4 (b)所示), 这种情况的激光输出将是双脉冲或多脉冲, 因此在一定的染料浓度下, 可降低输入光泵能量(但必须保证超阈值), 以获得单脉冲运转。

2. 可饱和染料浓度的影响

由表 1 可以看到, 可饱和染料浓度对输出特性也有一定影响。双、多脉冲的阈值泵浦能量随可饱和染料浓度的提高而增大(浓度升高, 透过率降低)。在一定的光泵水平下, 逐渐提高染料浓度, 即降低其透过率, 输出将由多脉冲转变为单脉冲。表 2 列出了我们的实验结果。

表 2 可饱和染料浓度对输出特性的影响

| 染料透过率(T_s) 泵浦能量(J) | 激光输出 | |
|---------------------------|--------|-------------|
| | 单 脉 冲 | 双、多脉冲 |
| 50 | 40—66% | $\geq 72\%$ |
| 55 | 40—60% | $\geq 66\%$ |
| 61 | 37—46% | $\geq 50\%$ |
| 66 | 40—46% | $\geq 50\%$ |
| 72 | 40% | $\geq 46\%$ |
| 76 | | $\geq 40\%$ |

由上述理论也能很好地解释这一实验结果。对一定强度的光泵能量, 其噪声脉冲强度也一定。当染料浓度较低时, 在染料的非线性吸收阶段, 设有两个或多个脉冲强度超过 I_n 值, 这时激光输出为多脉冲。若我们提高染料浓度, 吸收体的 I_n 值也相应提高, 即从 I_{n1} 提高到 I_{n2} , 这时仅剩下一个脉冲超过 I_{n2} 值, 如图 5 所示。激光的输出将由双、多脉冲转为单脉冲输出。

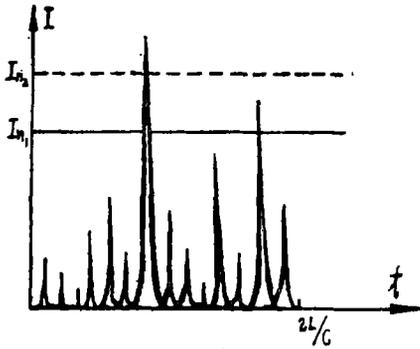


图5 $2L/C$ 中噪声脉冲强度
与不同 I_n 值的关系

从以上的理论分析和实验结果得出, 输入光泵能量及可饱和染料浓度对超短光脉冲的输出特性有较大的影响。为了得到锁模单脉冲运转, 对一定浓度的染料, 输入光泵能量只能在一定范围内变化; 而在一定的光泵水平下, 染料浓度也只能在一定范围内调配。

四、结 论

以上, 就对撞脉冲锁模激光器的若干问题进行理论分析和实验探讨, 指出了抗共振环在CPM腔中起了压缩脉冲宽度, 提高输出稳定性的重要

作用, 并通过简单计算选择了抗共振环分束镜的最佳透过率应等于其反射率 $R = T = 50\%$ (假定略去镜的其它损耗)。此外, 实验探讨和理论分析了 Nd_3YAG , CPM 激光器的输入光泵能量及可饱和吸收体浓度对锁模光脉冲输出特性的影响。证明了在一定的光泵水平下, 可通过提高染料浓度, 以获得激光器的单脉冲运转; 而对一定浓度的染料, 可降低输入光泵能量 (但必须保证超过阈值), 以获得单脉冲运转。目前虽然对撞脉冲锁模的研究已有不少报导, 但尚有许多问题有待进一步探讨研究, 以便使之日臻完善。

参 考 文 献

- [1] R.L.Fork, B.L.Greene and C.V.Shank, Appl. Phys. Lett., 38, 9(1981), 671.
- [2] 罗山译, 国外激光, 10(1985), 42.
- [3] 林星、张文珍、吴逢铁等, 光学学报, 5, 9(1985), 794.
- [4] 刘一先、马海明等, 光学学报, 6, 1(1986), 1.
- [5] W.Dietel, Opt. Comm., 43, 1(1982), 69.
- [6] M.S.Stix and E.P. Ippen., IEEEJ. Quant. Electron., QE-19, 4(1983), 520.
- [7] Lin Xing, Zhang Wen Zheng, Wu Feng Tie et.al., Bulletin of the American Physical Society, 30, 10(1985), 1836.

Some Problems on a Colliding Pules Mode Locked Laser

Wu Fengjie Zhang Wengzheng Lin Xing

Abstract

In this paper, the effect of an antiresonant ring structure and its elements on a colliding pulse mode locked laser is analysed on a theoretical basis, the influences of optical pumping energy and saturable absorber concentration on the characteristics of ultrashort pulse output are studied theroretically and experimentally.