

# 相干叠加脉冲锁模激光器调制特性的研究\*

王清月 沈家强 章若冰 张贵忠

(天津大学精密系, 天津 300072)

## 提 要

本文在理论上发现了相干叠加脉冲锁模激光器的调制特性, 并对其进行了全面的分析和计算。对于相干叠加脉冲锁模激光器的脉冲压缩及调制特性给予了详尽的数值计算结果和清晰的物理图象的解释, 并提出利用相干叠加脉冲锁模激光器的调制特性产生更短脉冲的可能性。

关键词: 相干叠加脉冲锁模激光器, 调制特性, 自相位调制效应。

## 一、前 言

80年代激光领域最大的成果之一就是孤子激光器<sup>[1]</sup>的实现, 孤子激光器是由一个包含增益介质的主腔和一个包含非线性介质(如光纤)的副腔组成。副腔中的非线性介质具有负的色散是产生光孤子的条件<sup>[2,3]</sup>。最近的研究表明<sup>[4,5]</sup>: 含有正的群速度色散的副腔在不具备孤子成形的条件下, 也能压缩脉冲宽度, 产生超短脉冲。这种含有正色散非线性介质外腔的激光器称为相干叠加脉冲锁模(Additive Pulse Mode-locking 简称 APM)激光器。它利用外腔中非线性介质所产生的自相位调制使得其光脉冲在经过外腔再返回主腔时, 与主腔中的光脉冲在耦合镜上产生相干叠加。由于非线性介质中的自相位调制效应所引起的位相变化 $\Phi$ 是与光的强度 $I(t)$ 及非线性折射率 $n_2$ 成正比的, 即 $\Phi \propto n_2 \cdot I(t)$ , 所以, 在两个脉冲叠加时, 不同部位具有不同的相位差。适当地控制脉冲不同部位的相位差, 使得两个脉冲叠加后的脉冲宽度比原来主腔中的脉冲宽度更窄、从而完成脉冲压缩过程。即使外腔中的脉冲宽度比主腔中的宽, 如果位相控制合适, 叠加后也会产生比主腔脉冲更窄的脉冲。这与孤子激光器的压缩过程有着本质的区别。后者要求经过外腔的脉冲, 其宽度要比主腔中的脉冲宽度窄。

自1989年以来, 相干叠加脉冲锁模激光器的研究受到普遍的重视, 形成锁模技术的一个新的热点, 先后在色心激光器<sup>[6,7]</sup>、Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>激光器<sup>[8]</sup>、Nd:YAG激光器<sup>[9,10]</sup>、Nd:YLF激光器<sup>[11]</sup>、钕玻璃激光器<sup>[1,13]</sup>实现了相干叠加脉冲锁模的锁模运转, 并获得 ps 甚至 fs 的锁模脉冲宽度。在众多实验室对相干叠加脉冲锁模激光器进行实验研究的同时, 只有 Ippen<sup>[14]</sup>等人对其进行了理论分析, 但其研究仅限制在小的非线性相位移的情况下进行的。对于具有大的非线性相位移的相干叠加脉冲锁模激光器至今未见过国内外有过报道。本文正是在这方面进行了理论分析和计算, 发现了在大的非线性相位移的情况下, 相干叠加脉冲锁模激光器所表现出的时间调制特性。这种时间调制特性与王清月等人<sup>[15,16]</sup>在通常的对

收稿日期: 1991年1月29日; 收到修改稿日期: 1991年4月22日

\* 该课题得到国家科学基金的资助。

撞脉冲锁模激光器中发现的调制特性相比, 虽都是自相位调制效应引起的, 但其产生机理是不同的, 本文着重计算和分析了相干叠加脉冲锁模激光器这种时间调制特性与各个参数的关系, 并提出由此效应获得更短光脉冲的可能性。

## 二、原理及数学模型

相干叠加脉冲锁模激光器包含主腔和副腔两部分, 如图 1 所示, 副腔含有正色散的光纤

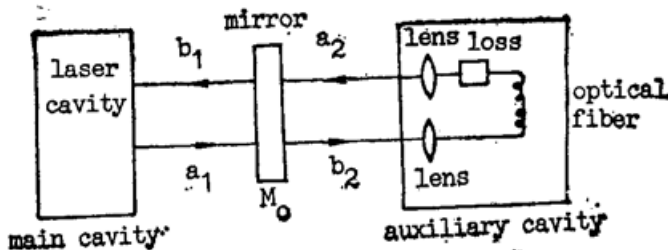


Fig. 1 Schematic of CCM laser

主腔、副腔通过平面镜  $M_0$  耦合。由物理光学可知: 主腔中的入射脉冲  $a_1$ , 反射脉冲  $b_1$  和外腔中的入射脉冲  $a_2$ , 反射脉冲  $b_2$  之间的关系为

$$\begin{aligned} b_1 &= \gamma a_1 + \sqrt{1-\gamma} a_2, \\ b_2 &= \sqrt{1-\gamma} a_1 - \gamma a_2, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\gamma$  为平面镜  $M_0$  上的振幅反射率。外腔中的反射脉冲  $b_2$  经过非线性光纤后变为  $a_2$ , 假设光纤的传输效率为  $L$ , 在不考虑色散情况下, 则  $a_2, b_2$  之间的关系为

$$a_2(t) = L \exp[-i(\phi + \Phi)] b_2, \quad \Phi(t) = k[|a_2(t)|^2 - |a_2(0)|^2], \quad (2)$$

$\Phi$  为脉冲经过光纤后产生的自相位调制量。 $k$  为与光纤长度及非线性折射率有关的参数, 它的量纲为:  $\text{cm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ 。 $\phi$  为与两个腔中的脉冲相位移及副腔中脉冲峰值处产生的自相位调制量有关的参数,  $\Phi, \phi$  的单位为: 弧度。定义在脉冲顶部  $\Phi(0) = 0$ , 且  $\Phi_0 = k|a_2(0)|^2$ 。由(1)、(2)式得到

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma^2}} \left\{ 1 + \frac{\gamma}{L} \exp[i(\phi + \Phi)] \right\} a_2, \quad a_1 = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma^2}} \left\{ \gamma + \frac{1}{L} \exp[i(\phi + \Phi)] \right\} a_2. \quad (3)$$

(3)式说明了脉冲  $a_1, b_1$  和参数  $\gamma, L, \phi, \Phi$  之间的关系。

当脉冲宽度较窄时, 需考虑光纤中的色散对脉宽的影响。光纤的色散引起的相位移为

$$\phi(\omega) = k(\omega_0)z + \frac{\partial k}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} (\omega - \omega_0)z + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 z + \dots, \quad (4)$$

(4)式中只有二阶项及更高阶项影响脉冲形状。一般情况下, 只考虑二阶色散, 因此在时域范围内变为算符

$$\hat{D} = \left( 1 + iD \frac{d^2}{dt^2} \right), \quad (5)$$

式中  $D$  为光纤中的群速度色散系数, 量纲为  $\text{ps}^2$ 。外腔中的脉冲  $b_2$  经过光纤以后变为  $a_2$ , 则描述  $a_2, b_2$  之间关系的方程为

$$a_2(t) = L \exp[-i(\phi + \Phi)] \left( 1 + iD \frac{d^2}{dt^2} \right) b_2(t), \quad (6)$$

由(1)式和(6)式可以分析在考虑色散情况时的脉冲波形变化情况。

### 三、计算结果

(1) 利用(3)式计算了光纤的非线性相位移量由小到大变化过程中脉冲波形变化情况。假设入射波为高斯波形,  $t=0$  时的光强为单位光强, 脉冲宽度为单位时间即  $t_0=1$ 。为了更加清楚地观察脉冲宽度变化, 在绘制各脉冲波形时, 进行了归一化处理:  $I(t)/I(0)$ 。参数  $\gamma=0.8$ ,  $L=0.3$ 。图 2 给出了  $\phi=0$ ,  $k=3.14 \text{ cm}^2 \cdot \text{W}^{-1}$  时主腔中入射和反射的脉冲波形。图 3 给出了在相同的  $k$  值, 但  $\phi=-(\pi/2)$  时主腔中入射和反射脉冲波形。可以清楚地看到  $\phi=-(\pi/2)$  比  $\phi=0$  时的脉冲得到了更大的压缩。换句话说, 当主腔比副腔的光程长度长 ( $\lambda/4$ ) 时(这相当于副腔对主腔有一个线性相位移予偏置量  $\phi=-\pi/2$ ), 光脉冲得到更有效的压缩。而当两个腔的光程长度相等时(这相当于副腔对主腔的线性相位移予偏置  $\phi=0$ ), 光脉冲虽然也得到了压缩, 但并非对应着最大的压缩系数。这恰恰说明为什么目前所有相干叠加脉冲锁模激光器的实验研究中, 都将线性予偏置控制在  $-\pi/2$  附近。解释这一结果的物理图象是非常清楚的: 由(2)式可知, 由于自相位调制作用, 所引起的非线性相位移量在脉冲顶部为零(这是人为定义的), 而在脉冲的尾部为  $-\pi$ (取  $\Phi_0=3.14$ ), 因此脉冲的中部为  $-\pi/2$ 。如果事先将主腔和副腔的光程长度给予  $\lambda/4$  的偏置, 即  $\phi=-\pi/2$ , 那么, 这时脉冲中间的总的相位移量为  $-\pi$ , 因此, 叠加后的脉冲振幅在中部得到了最大程度的抵销, 这显然对应着脉冲宽度的最大压缩。

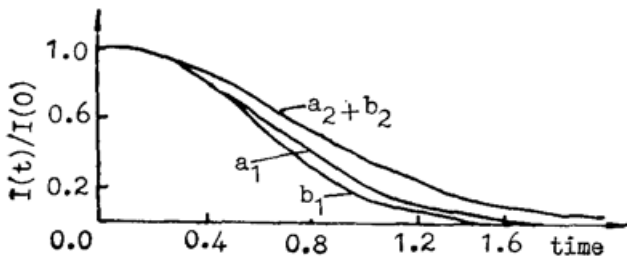


Fig. 2 Pulse shapes when  $\phi=0$ ,  $K=3.14 \text{ cm}^2/\text{W}$ ,  $r=0.8$ ,  $L=0.3$ ,  $t_0=1$

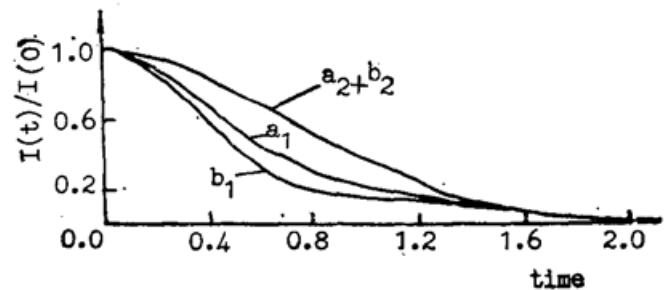


Fig. 3 Pulse shapes when  $\phi=\frac{\pi}{2}$ ,  $K=3.14 \text{ cm}^2/\text{W}$ ,  $L=0.3$ ,  $t_0=1$

(2) 可以想象, 当光脉冲在副腔的非线性介质(如光纤)中传输时, 如果其非线性相互作用很强(如  $n_2$  很大, 或者光纤较长), 则其从副腔出来进入主腔时, 必然携带很大的非线性相位移量  $\Phi$ , 换句话说, 在其脉冲包络内,  $\Phi(t)$  值必然会多次出现  $\pi$  的整数倍, 因此, 当与主腔中的光脉冲叠加以后, 光脉冲的振幅调制现象就会出现, 而且脉冲包络内的调制数  $N$  会随着  $k$  的增大而增加。图 4(a) 及 (b) 给出随  $k$  的增加脉冲出现调制的计算结果。图 5 给出了脉冲包络内调制周期个数  $N$  随  $k$  值的变化曲线。

(3) 上述所有计算结果都是没有考虑色散的情况下得到的。这对于脉冲宽度较宽或者色散系数较小的系统是适用的但是如果相干叠加脉冲锁模激光器的非线性腔的色散对于脉冲波形有明显的影响时, 色散对于相干叠加脉冲锁模激光器调制特性的影响就必须考虑, 假设入射波的脉宽为  $1 \text{ ps}$ , 绘制波形时归一化处理:  $I(t)/I_a(0)$ 。图 6(a) 和 (b) 分别给出了群速度色散系数  $D=1.6 \text{ ps}^2$  和  $5 \text{ ps}^2$  时的各脉冲波形。图 7 给出了脉冲包络内调制周期个数

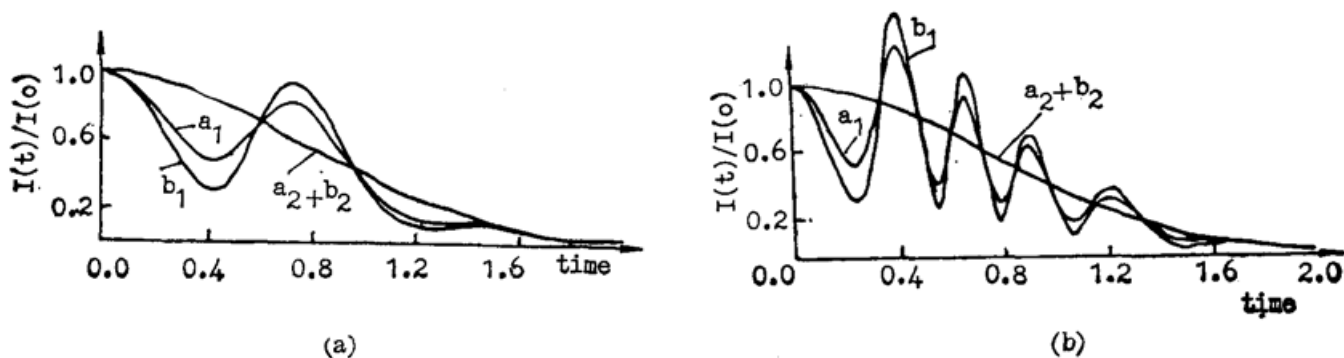


Fig. 4. Pulse shapes when  
 (a)  $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ,  $K = 10 \text{ cm}^2/\text{W}$ ,  $r = 0.8$ ,  $L = 0.3$ ,  $t_0 = 1$   
 (b)  $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ,  $K = 20 \text{ cm}^2/\text{W}$ ,  $r = 0.8$ ,  $L = 0.3$ ,  $t_0 = 1$

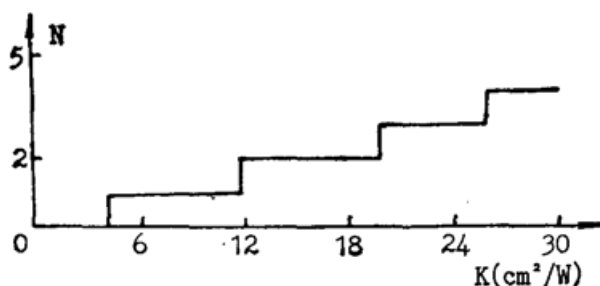


Fig. 5 The relation between the number of modulation period and the parameter:  $K$  when  $r = 0.8$ ,  $L = 0.3$ ,  $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ,  $t_0 = 1$

$N$  随色散系数  $D$  的变化曲线。可见,随着色散量的增加,脉冲包络内的调制个数逐渐减少,最后调制现象被完全抹掉。作者认为这是因为:超短光脉冲是由许多不同频谱成分组成的,具有一定的频谱宽度,通过非线性介质(如光纤)以后,由于介质中的自相位调制作用,产生啁啾效应,脉冲的各部位具有不同的即时频率,脉冲的频谱被展宽。同时,非线性介质的色散作用,使脉冲的各个部位具有不同的传播速度,传播慢的频谱,通过光纤以后,就会消失掉。即光纤有一定的载频宽度,当具有调制特性的脉冲在光纤中传播时,由于自相位调制效应,频谱不断展宽。色散将超过光纤载频宽度的脉冲部分消失。如果色散系数较小,消失较慢,调制特性有可能保持下来,色散系数较大时,调制现象很快就会消失。

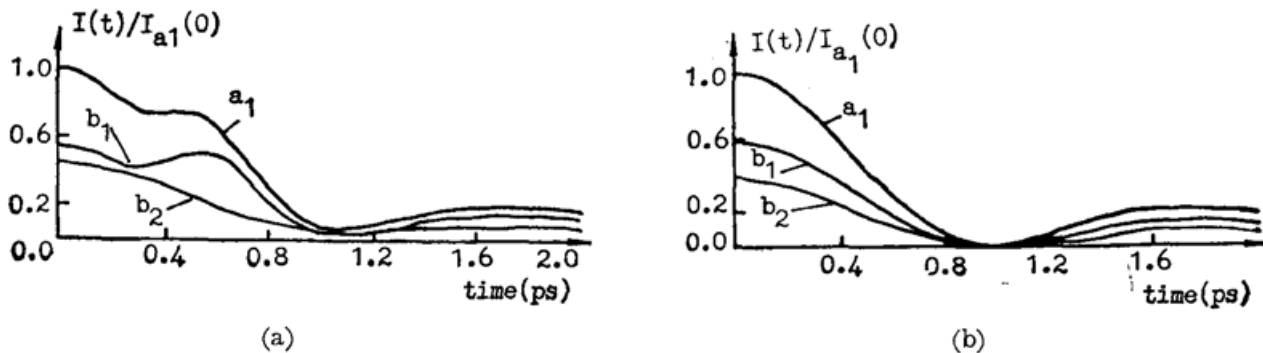


Fig. 6 Pulse shapes when dispersion is considered for,  
 (a)  $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ,  $\Phi_0 = 20$ ,  $r = 0.8$ ,  $L = 0.3$ ,  $t_0 = 1 \text{ ps}$ ,  $D = 1.6 \text{ ps}^2$   
 (b)  $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ,  $\Phi_0 = 20$ ,  $r = 0.8$ ,  $L = 0.3$ ,  $t_0 = 1 \text{ ps}$ ,  $D = 5.0 \text{ ps}^2$

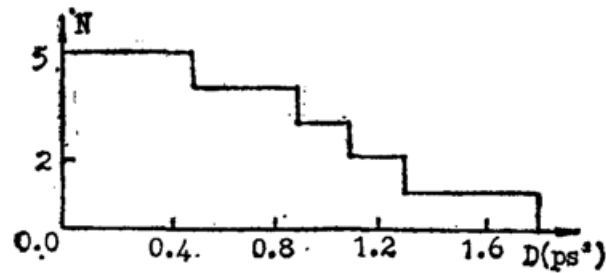


Fig. 7 The relation between the number of modulation period and dispersion:  $D$  when

$$\phi = \frac{\pi}{2}, \Phi_0 = 20, r = 0.8, L = 0.3, t_0 = 1 \text{ ps}$$

#### 四、计算结果的讨论

在相干叠加脉冲锁模激光器中,由于外腔中的非线性介质的自相位调制效应,当主腔中的光脉冲和外腔中的光脉冲在耦合镜上相遇时,使得在脉冲的不同部位产生了不同程度的振幅相加或振幅相消。如果适当控制主腔和副腔的光程差(即线性相位移的予偏置 $\phi$ ),在 $k$ 值不大的情况下,就会使得脉冲中部振幅相消更为显著,此时脉冲得到最有效的压缩,这一情况对应着线性相位移予偏置量 $-\pi/2$ 附近。如果在副腔中的光脉冲与非线性介质的相互作用非常强,则该脉冲在从副腔中输出时所携带的非线性相位移量大于 $2\pi$ 。那么叠加的结果就会出现调制现象,其调制周期的个数随非线性相位移量 $\Phi$ 的增加而增加。参数控制适当时,就会在原脉冲包络内出现由许多窄脉冲组成的脉冲序列。这为在相干叠加脉冲锁模激光器内获得更窄脉冲提供了一种新的可能性。该文由计算所获得的相干叠加脉冲锁模激光器的调制效应有待于实验的验证。

#### 参 考 文 献

- [1] L. F. Mollenauer, R. H. Stolen; *Opt. Lett.*, 1984, **9**, No. 1(Jan), 13.
- [2] 章若冰,张立原等;《光学学报》,1989, **9**, No. 7(Jul), 649。
- [3] 章若冰,张伟力等;《中国激光》(待发表)。
- [4] K. J. Blow, D. Wood; *Opt. Soc. Am. (B)*, 1988, **5**, No. 3(Mar), 629.
- [5] A. G. Bulushev, E. M. Dianov *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 17(Sep), 968.
- [6] J. Mark, L. Y. Liu *et al.*; *Opt. Lett.*, 1989, **14**, No. 1(Jan), 48.
- [7] K. J. Blow, B. P. Nelson; *Opt. Lett.*, 1988, **13**, No. 11(Nov), 1026.
- [8] J. Goodberlet, J. Jacobson *et al.*; *Opt. Lett.*, 1989, **14**, No. 20(Oct), 1125.
- [9] J. Goodber let, J. Jacobson *et au.*; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 9(May), 504.
- [10] L. Y. Liu, J. M. Huxley *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 10(May), 533.
- [11] J. M. Liu, J. K. Chee; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 12(Jun), 685.
- [12] F. Krausz, Ch. Spielmann *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 13(Jul), 737
- [13] F. Krausz, Ch. Spielmann *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 19(Oct), 1082.
- [14] E. P. Ippen, H. A. Haus *et al.*; *Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**, No. 9(Sep), 1737.
- [15] Chang-Yue Wang *et al.*; *Opt. Lett.*, 1989, **14**, No. 10(May), 497.
- [16] Chang-Yue Wang *et al.*; *Opt. Lett.*, 1990, **15**, No. 17(Sep), 965.

## Modulation characteristics of APM laser

WANG QINGYUE, SHEN JIAQIANG ZHANG

RUEBING AND ZHANG GU ZHONG

*(Department of Precision Instrument Engineer Tianjin University Tianjin, 300072)*

(Received 29 January 1991; revised 22 April 1991)

### Abstract

The modulation effect in a additive pulse mode-locking (APM) laser was discovered for the first time theoretically and was analyzed and calculated in detail. This paper gives the explanation for the pulse compression and modulation in APM laser. We suppose that the modulation effect in APM laser should provide a possibility to get shorter pulse.

**Key words:** APM laser, modulation characteristics, the effect of self-phase modulation.