

自锁模钛宝石激光器多脉冲运转特性研究*

郑向阳 陈毓川 谢仲辉 陈颖宇 文锦辉 赖天树 林位株

(中山大学物理系超快速激光光谱学国家重点实验室系, 广州 510275)

摘 要 对自锁模钛宝石激光器中多脉冲的特性和成因进行了较详细的分析, 提出腔内脉冲周期性散射减弱了腔内自振幅调制的理论模型。据此所作的数值模拟结果, 很好地解释了实验现象。

关键词 多脉冲运转, 周期性散射, 自锁模钛宝石激光器。

1 引 言

自锁模钛宝石飞秒激光器出现多脉冲运转状态是人们早已观察到的现象^[1, 2], 这种多脉冲状态指的是激光器在一个振荡周期中不是只产生一个飞秒脉冲, 而是出现两个甚至更多个脉冲。实际上这种多脉冲运转情况在其他被动锁模飞秒激光器, 例如对撞脉冲锁模染料激光器(CPM)中亦已观察到^[3]。以往有关多脉冲的情况多是作为副效应来报道的, 对多脉冲形成的机制亦未进行详细研究。近年来随着相干光谱学的发展, 采用两对飞秒脉冲的泵浦-探测技术已引入注目。因此, 不论是从抑制多脉冲的产生, 以获得峰值功率高的单一脉冲列, 或是从获得相位稳定的双脉冲, 以发展其应用等观点出发, 研究多脉冲产生的机理和控制方法都具有十分重要的理论和实践意义。本文正是从这一目的出发, 报道在自锁模钛宝石激光器中出现多脉冲运转的特性, 并对多脉冲产生的机制和条件作了较详细的分析和数值模拟, 理论曲线和实验结果很好地符合。

2 自锁模钛宝石激光器双脉冲特性

本文所述的自锁模钛宝石激光器中多脉冲情况与双色运转时^[4]和高阶孤子脉冲^[5]等情况所产生的多脉冲, 在表现形式和形成机制等方面有所不同。为清楚起见, 首先说明在实验中观察到的双脉冲情况。图 1(a) 和 (b) 分别示出自锁模钛宝石激光器输出双脉冲列的自相关曲线和功率谱图。这是在调整激光器的群速度色散补偿棱镜或调整泵浦光的强度时容易出现的情况。和通常的单脉冲情况不同, 激光输出脉冲列的强度自相关曲线不是单峰曲线, 而是三峰曲线, 左右两边的峰, 其峰值约为中间峰的一半。这是因为在飞秒脉冲的相关测量中, 当两列强度相近的脉冲两两重叠相关时, 相关信号最强, 因而产生中间的自相关峰; 当两列脉冲中只有一个脉冲相叠时, 相关信号约减少一半, 因而见到两旁的自相关峰。在三个自相关

* 国家自然科学基金(69676015)资助课题。

收稿日期: 1997-04-23; 收到修改稿日期: 1997-09-25

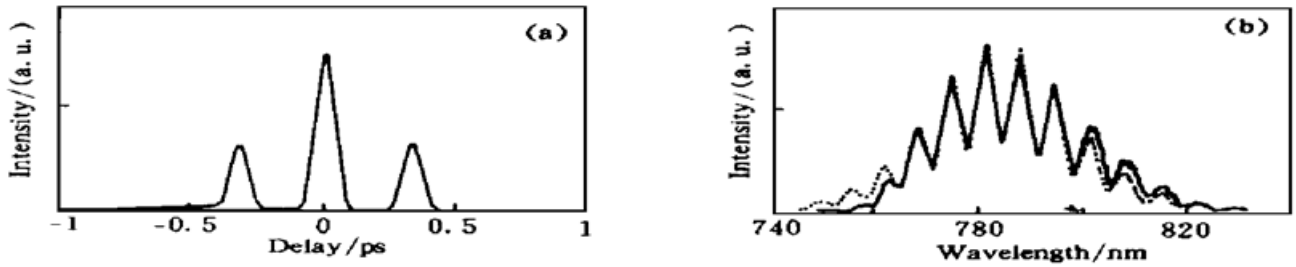


Fig. 1 (a) Intensity autocorrelation of double-pulse from SML Ti:sapphire laser,

(b) Intensity spectrum of double pulses. The dotted curve is the theoretical trace

峰中峰的间隔相等,且等于双脉冲的时间间隔,如图1(a)所示为0.33 ps。实验中发现调整色散补偿棱镜改变腔内群速度色散(GVD),双脉冲间隔会改变。图1(a)显示两脉冲脉宽相同,均为52 fs。图1(b)是双脉冲的特征频谱,中心波长为784 nm,在双曲正割轮廓下具有条纹结构。这是双脉冲光波场干涉的结果。假设输出的激光光波场 $F(t)$ 由两个光强相近、形状相同、在时间上相差 τ 的两个脉冲组成。

$$F(t) = f(t) + f(t - \tau) \exp(i\varphi) \quad (1)$$

式中 φ 代表两个脉冲间的相位差。对这一光波场作傅里叶变换得到

$$F(\omega) = f(\omega) \{1 + \exp[-i(\omega\tau + \varphi)]\} \quad (2)$$

通过自动扫描单色仪所观察到的是频谱强度

$$F(\omega) \otimes F^*(\omega) = 2f(\omega)f^*(\omega) [1 + \cos(\omega\tau + \varphi)] \quad (3)$$

式中 \otimes 为傅里叶卷积符号。这是以 $f(\omega)f^*(\omega)$ 为轮廓的有条纹的频谱,频谱条纹间隔为 $2\pi/\tau$ 。由频率与波长的关系可得脉冲时间间隔 τ 与频谱条纹波长间距之间的关系

$$\Delta\lambda = \lambda^2/c\tau \quad (4)$$

由图1(a)知, $\tau = 0.33$ ps, $\Delta\lambda = 6.2$ nm。图1(b)中的虚线为计算曲线,它和实验曲线符合得很好。实际计算中假定两个脉冲具有双曲正割轮廓,其峰值强度比为1:0.6。实验中亦观察到两脉冲强度相等的情况,此时强度自相关曲线中两旁的自相关峰值正好为中间峰的一半;其频谱中各条纹完全分裂,这和理论预期一致。从频谱曲线中可见,双脉冲间的相位差是恒定的。因为从(3)式可见,波峰与波谷的位置与位相差有关,若位相差在测量过程中不恒定,条纹的位置就会随时间变化,在测量中就只能测到平均值,而不能测到清晰的条纹。由于这种双脉冲的位相差是恒定的,所以有希望成为正在快速发展的相干光谱学的信号源。当这一信号光通过被检测介质时,如果此介质同时受另一相干光激发,将会使通过的信号光的相位发生变化,而使其频谱干涉条纹移动,从而能获得有关介质相位变化的信息^[6]。

3 双脉冲的形成机制

自锁模钛宝石激光器问世以来,人们对其锁模的启动以及脉冲压缩的机制作了大量的研究。现在公认的理论认为,由于自聚焦引起的自振幅调制(SAM),腔内群速度色散和自相位调制,对锁模的启动与脉冲的压缩起主要作用。但是从这个理论模型出发并不能得出多脉冲的状态,从而不能对如何抑制或利用多脉冲提供有效的理论指导。下面将比较详细地讨论双脉冲的成因。

在钛宝石飞秒激光器中,飞秒脉冲的形成要经历锁模启动与脉冲压缩两个主要的过程。在锁模启动阶段,由于频谱窄,峰值功率低,所以自相位调制和群速度色散的相互作用对脉

冲形状的影响较弱。在这个初始阶段起作用的主要是由自聚焦与增益在空间分布形成的软光栅相互作用引起的自振幅调制。在这个阶段, 自振幅调制必须有足够的强度才能抵消各模式间随机的耦合与去耦, 达到锁模运转状态。这个阈值是^[7]

$$kP(0) > \frac{1}{\ln(m_i)} \frac{T_r}{T_c} \quad (5)$$

其中 k 是表征腔内自振幅调制大小的常数, 它与介质的非线性系数, 腔的设计与调整等因素有关。 $P(0)$ 是初始状态的腔内平均功率, 在本文所述的激光器中大约是 8 W。 m_i 代表初始阶段在腔内振荡的模式数。 $\ln(m_i)$ 与 1 有相同的数量级。 T_r 是光在腔内来回一周所需时间, 激光器腔长约为 1.5 m, T_r 约为 10 ns。 T_c 是一次起伏的平均寿命, 它大约等于有效的模间相关时间。在克尔透镜自锁模钛宝石激光器中 k 值一般为 $10^{-7} \text{ W}^{-1[2]}$ 。从(5)式可以看出, k 和 $P(0)$ 越大越有利于锁模的起动。

在自振幅调制的作用下, 脉冲不断缩短, 峰值功率提高, 频谱展宽, 最终达到脉宽几十皮秒到十几皮秒的量级。此时如果不加棱镜对来补偿腔内正的群速度色散, 则脉宽不能继续缩短, 这时就进入了第二阶段——脉冲压缩阶段。在这个阶段, 频谱较宽, 群速度色散和自相位调制的相互作用对脉冲形状起主要作用, 如果腔内总的群速度色散是正的, 则自相位调制和群速度色散的相互作用使脉冲展宽, 脉冲就限制在皮秒的量级。如果腔内总的群速度色散是负的, 则自相位调制与群速度色散的相互作用使脉宽压缩到飞秒的量级。这个过程和光纤中孤子的形成与传播的机理是类似的。实际上, 上述两个过程并不是截然分开的, 而是相互影响的, 它们都对飞秒脉冲的形成起主要作用。

为了描述光波在钛宝石激光器中的运行情况, 引入传播算符, 并忽略高阶微扰项, 有^[8]

$$T = \exp(A + N + F) \quad (6)$$

式中: $A = k|v(t)|^2$, k 为反映自振幅调制作用大小的比例常数, $|v(t)|^2$ 为脉冲的瞬时功率; $N = -i\phi|v(t)|^2$, 反映自相位调制作用, ϕ 为脉冲在腔内走一周, 每单位功率因自相位调制产生的相移, 一般在 10^{-6} 量级; $F = i(D/2)d^2/dt^2$ 描述腔内群速度色散, 其中 $D = \mathcal{Q}'(\omega)$, 而 $\mathcal{Q}(\omega)$ 为不同频率成分光波在腔内走一周所引起的相位变化, ω_0 为激光中心频率, D 一般为 -10^3 fs^2 。

与孤子系统不同的是, 在激光器中群速度色散和自相位调制分别主要发生在不同的元件上。群速度色散主要发生在棱镜对中, 自相位调制主要发生在钛宝石棒中。因此在激光器中, 脉冲的形状要经历周期性的变化。如果脉冲能量不大, 则脉冲经过每一元件时, 所受的改变很小, 则这种周期性的调制作用可以忽略不计。但若脉冲能量较大, 则脉冲经过每一元件时都要受到显著的改变, 使得这种周期性的调制作用不能忽略。正如光通过周期性结构的光栅会受到衍射一样, 受到周期性扰动的光脉冲会受到散射的作用从而损耗能量^[9]。这一效应将引进一个连续的背景。周期性散射引进的微小损耗可以完全破坏脉冲, 因为散射光与脉冲在同一方向, 背景与脉冲都同样会受到放大, 所以脉冲因周期性散射造成的能量损耗不能由增益得到补偿。这一效应只能由腔内的自振幅调制作用来补偿。在自振幅调制的作用下, 强度低的背景将受到比脉冲更大的损耗, 最终在腔内脉冲获得净增益, 而背景光却是净损耗。要得到稳定的脉冲运转状态, 自振幅调制要足够强, 足以压制背景光。如果散射增强, 自振幅调制不足以有效地压制背景, 则背景将不断增强, 在腔内各种效应的作用下最终会发展成第二个脉冲。

通过以上分析, 作者认为, 双脉冲产生的原因在于存在一个随着光强的增大而使得 k 变小的散射效应。由于散射效应与光强平方成正比, 有效的 k 变成

$$k = k_0 - \alpha I \quad (8)$$

k_0 代表无散射效应的系数, α 表征散射效应的作用, I 为光强。

利用修改后的传播算符, 对脉冲发展的第二阶段进行了数值模拟。其中 A 已计及了群速度色散和自相位调制周期性调制的散射效应。

图 2 画出了数值模拟的结果, 其中 $D = -300 \text{ fs}^2$, $k = 10^{-7} \text{ W}^{-1}$, $\phi = 10^{-6} \text{ W}^{-1}$, $\alpha = 2 \times 10^{-14} \text{ W}^{-2}$ 。 $v(t)$ 取双曲正割函数作为初始波形, 初始脉宽为 2.5 ps 。图 2 的曲线从下到上分别是脉冲在腔内经过 0、800、2600 次循环的波形。从结果可以看出脉冲首先被压缩, 光强增大。随着光强的增大散射效应增强, 有效的 k 值不断减小, 由于腔内的功率保持不变, 散射的光会形成第二个脉冲并继续被压缩直到由群速度色散与自相位调制所决定的孤子脉冲的脉宽。改变其他参数, 例如增加泵浦功率, 会出现三脉冲或更多脉冲的情况, 反之减少腔内泵浦功率或改变腔内群速度色散, 能有效地抑制双脉冲获得单脉冲输出, 如图 3 所示。此图的参数为 $\alpha = 1.1 \times 10^{-14} \text{ W}^{-2}$, 其他参数与图 2 相同。这一情况说明, 维持激光器单脉冲运转的有效措施是选择适当的泵浦功率, 减少散射或增加腔内自振幅调制效应, 这些情况已为本实验与其他的实验所证实^[2, 10]。

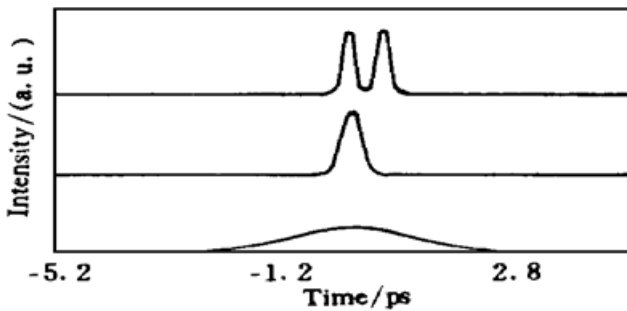


Fig. 2 Numerically simulated evolution of double pulse operation

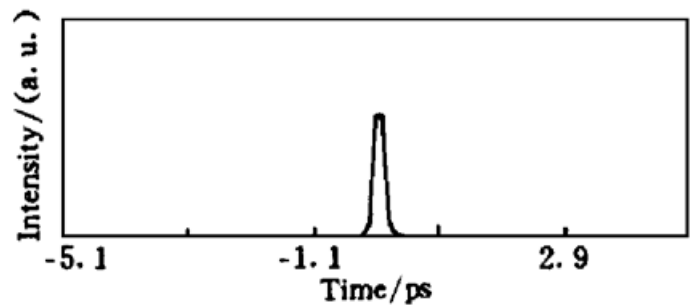


Fig. 3 Simulated curve for single-pulse operation. The parameters for the operation are the same as that in Fig. 2 except that the scattering α is reduced to $1.1 \times 10^{-14} \text{ W}^{-2}$

双脉冲的分裂情况很大程度上决定于腔内群速度色散。图 4 的曲线从下到上分别是 D 为 -300 fs^2 、 -310 fs^2 、 -320 fs^2 、 -330 fs^2 , 其他参数与图 2 相同的条件下, 脉冲在腔内经历了 4500 次后的波形。从图 4 可以看出, 脉冲分裂间距对群速度色散很敏感, 因此可以在不显著改变脉宽的情况下, 通过改变群速度色散来控制脉冲分裂间隔。实验中发现, 激光器出现双脉冲是稳定的, 但会随操作条件而异。这一现象也这其他作者所观察到^[11], 其原因正是由于在不同条件下群速度色散会有差异。

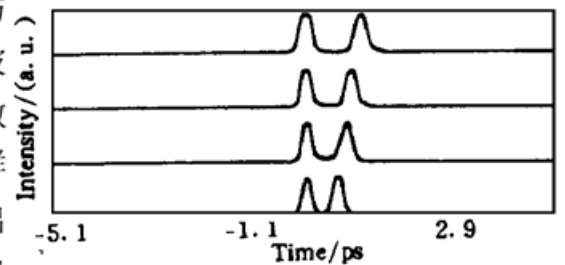


Fig. 4 The separation of the double pulses varies with GVD. From lower to upper, D is -300 fs^2 , -310 fs^2 , -320 fs^2 , -330 fs^2 , respectively

结 论 在自锁模钛宝石激光器多脉冲运转特性的理论和实验研究中, 比较详细地分析了双脉冲形成的机制, 提出了一个有关脉冲在腔内经受周

期性散射引致自振幅调制减弱的新的模型。据此所作的数值模拟计算曲线很好的解释了实验结果, 亦说明了有效抑制和控制双脉冲的方法, 在腔内自振幅调制效应弱或者是散射效应强的时候, 单脉冲运转不是稳定的, 而容易出现双脉冲运转。要获得稳定的单脉冲运转, 最有效的方法是增强腔内自振幅调制或者调节腔内群速度色散和自相位调制, 以减少腔内周期性散射。这些结果对有关理论和实验研究都是有意义的。

参 考 文 献

- [1] D. E. Spence, W. Sibbett, Femtosecond pulse generation by dispersion-compensated coupled-cavity, mode-locked Ti:sapphire laser. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(10): 2053~ 2060
- [2] C. Spielmann, P. F. Curley, T. Brade *et al.*, Ultrabroadband femtosecond lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(4): 1100~ 1115
- [3] J. - C. Diels, Femtosecond dye laser in, *Dye lasers, Principle and Application*, F. Duarteomd, L. Hillman, Eds, Boston: Academic Press, 1990.
- [4] D. R. Dykaar, S. B. Darack, Sticky pulses: two-color cross-mode-locked femtosecond operation of a single Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(8): 634~ 636
- [5] T. Tsang, Observation of high-order solitons from a mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(4): 293~ 295
- [6] E. Tokunaga, A. Terasaki, T. Kobayashi, Femtosecond phase spectroscopy by use of frequency-domain interference. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(5): 753~ 771
- [7] F. Krausz, M. E. Fermann, T. Brabec *et al.*, Femtosecond solid state lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(10): 2097~ 2021
- [8] T. Brabec, Ch. Spielmann, F. Krause, Mode locking in solitary lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24): 1961~ 1963
- [9] J. P. Gordon, Dispersive perturbation of solitons of the nonlinear Schrödinger equation. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1992, **9**(1): 91~ 97
- [10] 林位株, 赖天树, 陈毓川等, 由自锁模钛宝石激光器产生 19 fs 脉冲. 光学学报, 1995, **15**(8): 1157 ~ 1152
- [11] Ching-yuie Wang, Weili Zhang, K. F. Lee *et al.*, Pulse splitting in a self-mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Commun.*, 1997, **137**(1~ 3): 89~ 92

Multiple-Pulse Operation of a Self-Mode-Locked Ti:Sapphire Laser

Zheng Xiangyang Chen Yuchuan Xie Zhonghui Chen Yingyu
Wen Jinhui Lai Tianshu Lin Weizhu

(State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy, Department of Physics,
Zhongshan University, Guangzhou 510275)

(Received 23 April 1997; revised 25 September 1997)

Abstract The characteristics of the multiple-pulse operation of a self-mode-locked (SML) Ti:sapphire laser have been analyzed in more detail. A novel model of the decreased self-amplitude-modulation induced by intracavity periodical scattering is presented. Numerical simulations based on the model give a good explanation to the experimental results.

Key words multiple-pulse operation, periodical scattering, SML Ti:sapphire laser.