

采用混合染料饱和吸收体 获得 33 fs 激光脉冲*

林位株 丘志仁 徐文成 黄作柱
(中山大学激光与光谱学研究所, 广州 510275)

提要: 本文介绍采用 DODOI 和 Malachite green (MG) 混合染料作为饱和吸收体, 在 CPM 染料激光器中获得 33 fs 脉冲的结果。

关键词: CPM 染料激光器, 饱和吸收体

33fs pulse generation by using mixed dye saturable absorber

Lin Weizhu, Qui Zhiren, Xu Wencheng, Huang Zuozhu
(Institute of Laser and Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou)

Abstract: 33-fs pulses have been generated from CPM with a mixed DODOI and malachite green (MG) absorber. The fast recovery and the higher absorption cross section of MG accelerate the shaping thus favor the mode locking.

Key words: CPM ring dye laser, saturable absorber

一、引 言

对撞脉冲锁模环形染料激光器(CPM)无疑是人们在产生超短脉冲过程中的重大进展。近年来,已能够由这种激光器直接产生 27 fs 甚至更短的激光脉冲^[1]。在这种激光器中, DODOI 通常被选作为饱和吸收体染料。我们发现,如果在 DODOI 溶液中加入适量的 Malachite green (MG) 染料,将有利于获得较短的脉冲,提高锁模的稳定性。实际上, MG 曾经被加入染料激光器的饱和吸收体中,以提高锁模的稳定性,获得 ps 和亚 ps 激光脉冲^[2,3]。Watanabe 等在分析 MG 的作用机制时指出, MG 的饱和恢复时间比 DODOI 的快,它加速了脉冲的压缩过程^[3]。对于 CPM 染料的激光器来说, MG 快的饱和恢复时间及其较大的吸收截面,亦有利于 fs 脉冲的形成。本文介绍在 CPM 染料激光器的饱和吸收体中加入 MG 以改善锁模的实验结果,并分析了 MG 在 fs 脉冲形成中的作用。

二、实验装置

我们的 CPM 染料激光器是一个六镜四棱镜近于线型腔的结构,示如图 1。环绕增益介质

收稿日期: 1989年10月4日。

* 本课题受国家自然科学基金资助。

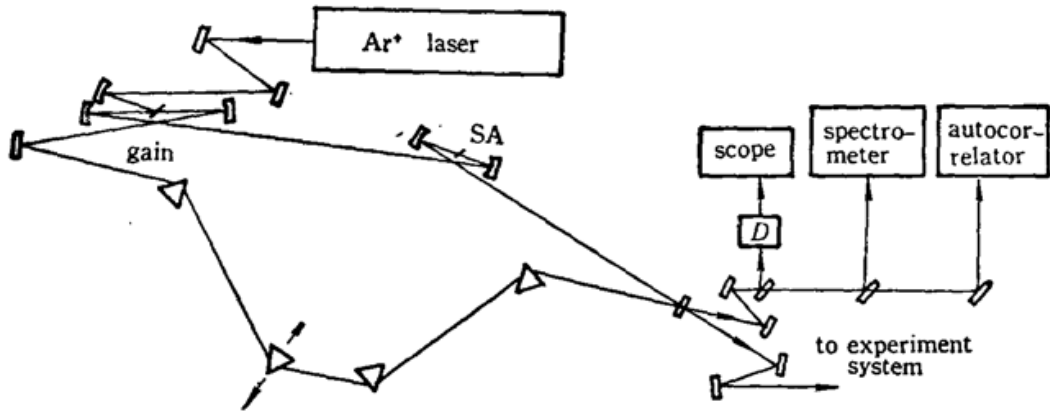


Fig. 1 Schematic of the six-mirror ring cavity incorporating a four-prism sequence CPM dye laser

和饱和吸收体的两个亚腔皆采用像散补偿式的折叠腔，腔镜的曲率半径分别为 10 cm 和 5 cm。在各腔镜上光束的折叠角已被调整至最小，使光束近于垂直入射。这样由各腔镜引起的色散及像差畸变便被减少至最低限度，有利于获得 TEM_{00} 模。所有腔镜均是单堆积电介质高反膜，中心波长为 620 nm (垂直入射时)，频带宽大于 100 nm。耦合输出镜的透过率为 3.5%。增益介质喷流和饱和吸收体喷流在焦点处的厚度分别为 100 μm 和 50 μm 。为了获得对 Ar^+ 激光全泵浦光约 95% 的吸收率，采用较高浓度 ($\sim 5 \times 10^{-3} \text{Mol}$) 的 Rh 6G 的乙二醇溶液作为增益介质。激光器连续运转时的泵浦阈值功率为 0.5 W。激光器输出的 fs 脉冲由快速示波器和转镜式实时自相关器监测。fs 脉冲宽度由计算机控制的无背景自相关器测量，其倍频晶体 KDP 厚度为 0.3 mm。由自相关器引起的被测脉冲增宽小于 1 fs。脉冲频谱由扫描式分光计记录。

三、结果和讨论

首先，我们根据泵浦功率和腔内损耗等情况选取能获得较短脉冲的最佳饱和吸收体 DODCI 的浓度，然后在其中加进不同浓度的 MG，以观察锁模的效果。当用浓度为 $3 \times 10^{-4} \text{Mol}$ 的 DODCI 乙二醇溶液作为饱和吸收体时，由 CPM 激光器获得的最短脉冲为 60 fs。而在这一饱和吸收体中加入适量的 MG 后，比较容易获得较短的脉冲。在 MG 的浓度为 $1 \times 10^{-5} \text{Mol}$ 时，获得的最短脉冲为 33 fs。再增加 MG 的浓度至 $3 \times 10^{-5} \text{Mol}$ 时，脉冲的宽度反而增加至 53 fs，并出现单向脉冲锁模情况，即只有一个方向的锁模脉冲输出。增加 DODCI 的浓度有利于抑制单向脉冲锁模，但泵浦功率阈值亦显著增高，脉冲宽度并无明显变窄。反之，使 DODCI 的浓度减少为 $2 \times 10^{-4} \text{Mol}$ ，MG 的浓度为 $2 \times 10^{-5} \text{Mol}$ ，则脉冲宽度增加至 70 fs，亦同样出现单向脉冲锁模情况。上述情况说明，具有较慢恢复时间的 DODCI 在双向对撞脉冲锁模中起着主导作用，而具有较快恢复时间的 MG 能加速脉冲的压缩过程，提高脉冲的增益峰值强度，因而也容易导致单向脉冲锁模^[4]。

采用最佳浓度的 DODCI 和 MG 混合染料饱和吸收体，由 CPM 激光器中产生的最短脉冲的强度自相关曲线示于图 2(a)。其全半宽度 $\Delta\tau = 51 \text{fs}$ ，从中得脉冲的全半宽度 $\Delta t_{FWHM} = 33 \text{fs}$ (假定脉冲的强度轮廓为双曲正割型)。激光脉冲的中心波长为 630 nm，每一方向的锁模脉冲列平均功率为 16 mW。激光脉冲的功率频谱示于图 2(b)，其频谱半宽度 $\Delta\lambda = 9 \text{nm}$ 。由图

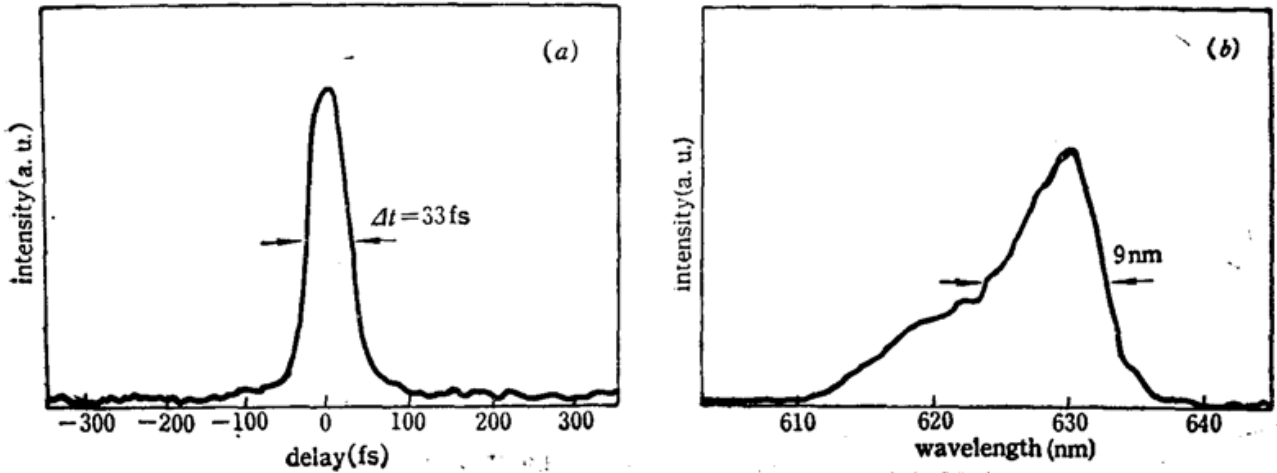


Fig. 2 Autocorrelation trace (a) and corresponding spectrum (b) of 33 fs pulses generated from the CPM dye laser. Time scale is calibrated for sech^2 shaped pulses

2 可算得激光脉冲的时间带宽积 $\Delta t \cdot \Delta \nu = 0.224$, 比转换极限脉冲的时间带宽积 0.314 小。这一情况以及功率频谱的不对称性说明, 激光器输出脉冲可能是不对称的^[5]。而加入饱和吸收体中的 MG 可能增加了这一不对称性。

如果假定脉冲的强度轮廓为非对称的双曲正割形状:

$$I(t) = I \left[\exp\left(\frac{t}{1+A}\right) + \exp\left(-\frac{t}{1-A}\right) \right]^{-2}, \quad (1)$$

以及非对称参数 $A = 3/4$, 那么脉冲强度自相关函数的计算值^[6]为

$$\Delta \tau \cdot \Delta t = 1.57 \quad \text{和} \quad \Delta \nu \cdot \Delta t = 0.221,$$

这和实验值是相符的。

饱和吸收体中快速饱和成分 MG 在 fs 脉冲形成中的作用表现在其影响损耗和自相位调制两方面。MG 具有一个与激光脉冲宽度相当快速饱和恢复时间 τ_A ^[7], 光脉冲通过这一快饱和吸收体时的透过率^[8]为

$$T = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} \simeq \exp(-\sigma_A N l) \simeq \exp\left(-\sigma_A \frac{N_0}{1 + I_{\text{in}}/I_S^A} \cdot l\right) \quad (2)$$

式中 σ_A 是吸收体的吸收截面, N_0 是总的吸收分子密度, l 是吸收体厚度, I_{in} 是入射光的强度, I_S^A 是饱和强度, 其值为

$$I_S^A = \frac{h\nu}{\sigma_A \tau_A}. \quad (3)$$

由(2)式可见, 入射脉冲的峰值比其前后沿具有较高的透过率。这样, 光脉冲通过快饱和吸收体后其前后沿便被较多削去, 脉冲便被压缩了。这和脉冲通过慢饱和吸收体的情况不同, 慢饱和吸收体仅仅削去入射脉冲的前沿, 而脉冲的后沿是由于增益介质的增益饱和而受到削弱的。现在, 在饱和吸收体中加进快饱和和恢复成分 MG, 它使脉冲的前、后沿都受到压缩。这一脉冲压缩作用和增益饱和引起的脉冲后沿压缩作用加在一起, 加速了脉冲的压缩过程。同时, 由于脉冲压缩加速, 使其增益峰值强度增加, 这对提高锁模稳定性、降低泵浦功率也是有利的。

MG 对饱和吸收体中自相位调制的影响在于其较大的吸收截面。图 3 示出了 DODOI 和 MG 的吸收光谱。图中虚线所示为 DODOI 二聚物吸收光谱^[9]。由图可见, 在激光中心波长

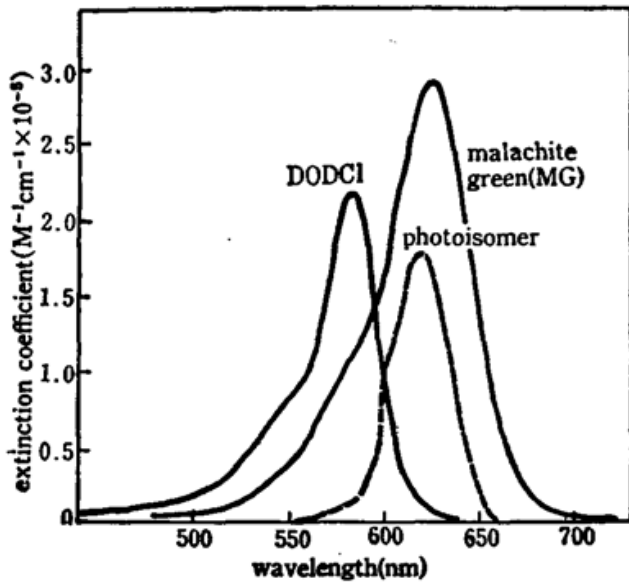


Fig. 3 Absorption spectra of the DODCI ground state and malachite green. The broken line is the absorption spectrum of the DODCI photoisomer state (from Ref. 9)

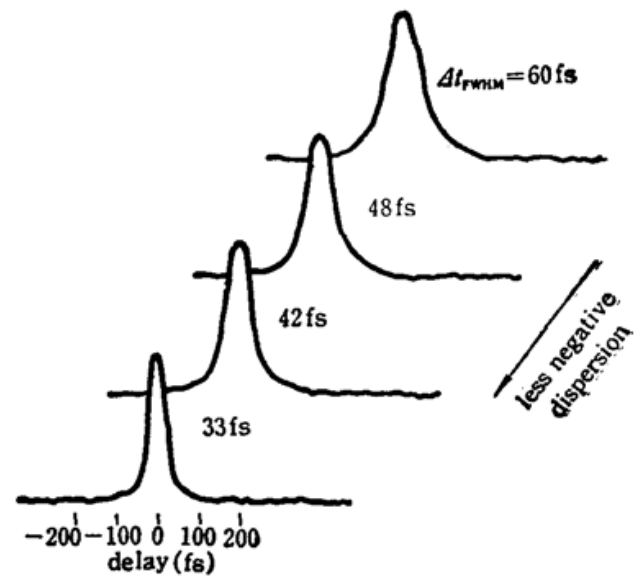


Fig. 4 Autocorrelation traces as a function of intracavity dispersion which is controlled by the adjustment of the prism

630 nm 处, MG 具有比 DODCI 大得多的吸收截面。因此,虽然在饱和吸收体中 MG 的浓度不高,但其含量的变化却有较灵敏的影响。由(3)式可见,具有较大吸收截面的成分,其饱和强度较低,因而容易被脉冲的前沿所饱和(漂白)。这样,光脉冲通过 DODCI 和 MG 混合染料饱和吸收体时,脉冲的前后沿虽受到压缩,但脉冲能量的大部分却较少损耗地通过饱和吸收体;如同聚焦光束通过介质一样,因 Kerr 效应会产生较大的正的自相位调制而使光脉冲获得较大的正的群速度色散。这一正的群速度色散可以由腔内色散补偿棱镜所引入的负群速度色散所平衡而获得较短的脉冲^[6]。图 4 示出色散补偿棱镜于不同位置时,CPM 激光器输出脉冲的自相关曲线。由图可见脉冲宽度由 60 fs 压缩至 33 fs 的情况。MG 在这方面所起的作用与 DODCI 二聚物的作用相仿。但为了获得足够浓度的二聚物,必须增加 DODCI 的浓度,这必然导致泵功率阈值的提高。因此,在饱和吸收体中加入适量的 MG 不失为一种有效的方法。

源永安等同志制造了本装置的 Ar^+ 激光器,在此致谢。

参 考 文 献

- 1 J. A. Valdmanis *et al.*, *Opt. Lett.*, **10**(3), 131(1985)
- 2 E. P. Ippen *et al.*, *Chem. Phys. Lett.*, **38**, 611(1976)
- 3 A. Watanabe *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**(4), 533(1983)
- 4 D. Kühlke *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-19**(4), 526(1983)
- 5 H. A. Haus, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**(9), 736(1975)
- 6 J.-C. M. Diel *et al.*, *Appl. Opt.*, **24**(9), 1270(1985)
- 7 M. J. Rosker *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(3), 321(1986)
- 8 A. Penzkofer, *Appl. Phys.*, **B46**, 43(1988)
- 9 D. N. Dempster *et al.*, *J. Chem. Soc. Faraday II*, **68**, 1479(1972)
- 10 O. E. Martinez *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B2**(5), 753(1985)