

高稳定度 CPM 飞秒激光特性的研究*

王水才

(中国科学院西安光机所, 710068)

提要: 利用最优化动力学参数的方法, 获得了高稳定度的 CPM 飞秒激光器运转特性。激光器输出平均脉宽 43 fs, 中心波长 624 nm, 平均功率 20 mW, 脉宽不稳定性 $\pm 3.3\%$, 频率不稳定性小于 10^{-6} 。

关键词: 高稳定飞秒激光, 最优化法, 色散补偿

Characteristic investigation of high stability CPM femtosecond lasers

Wang Shuicai

(Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Xi'an)

Abstract: Using optimization method of dynamic parameters, operation behavior of highly stable CPM femtosecond laser is obtained. The laser output is 43 fs average pulsewidths with a central wavelength at 624 nm, average power of 20 mW, unstability of pulsewidths of $\pm 3.3\%$ and unstability of frequencies of less than 10^{-6} .

Key words: high stability femtosecond laser, dispersion compensation, optimization method

一、引言

一台高稳定度的飞秒激光器是难能可贵的。本文通过理论分析与实验研究获得了高稳定运转的激光特性。该研究是在 1986 年建立的色散补偿六腔镜对撞脉冲锁模 (CPM) 飞秒激光器^[1]上进行的, 其基本理论分析已经报道^[2,3]。必须强调, 在 CPM 环型飞秒激光谐振腔中, 传播的光脉冲受到的增益和损耗与其脉冲能量、强度、频率等有关, 输出脉宽及功率的稳定性与自相位调制 (SPM)、群速弥散 (GVD)、增益和吸收的饱和程度有关, 最稳定的光脉冲在综合这些机制的动态平衡基础上才有可能得到。

二、理论计算

在 CPM 飞秒激光谐振腔中, 光脉冲的慢变化包络 $v(t)$ 和相移 $\phi(t)$ 的微积分方程^[3]:

收稿日期: 1991 年 1 月 3 日; 修改稿收到日期: 1991 年 7 月 4 日。

* 本工作受中国科学院及国家自然科学基金资助。

$$\left(g_0 + g' \mathcal{E} + g'' \mathcal{E}^2 - a_1 c^2 \mathcal{E}^2 + c_2 c \mathcal{E} + c_1 \frac{d}{dt} + 2a_2 c \mathcal{E} \frac{d}{dt} + a_2 c v^2 + a_1 \frac{d^2}{dt^2} \right) v(t) = 0 \quad (1)$$

$$\left[\phi_0 + \phi' \mathcal{E} + \phi'' \mathcal{E}^2 - a_2 c^2 \mathcal{E}^2 - c_1 c \mathcal{E} + c_2 \frac{d}{dt} - 2a_1 c \mathcal{E} \frac{d}{dt} + (b - a_1 c) v^2 + a_2 \frac{d^2}{dt^2} \right] v(t) = 0 \quad (2)$$

这里 g_0 是频率 ω 等于中心频率 ω_0 时的增益, g' 和 g'' 项表示增益饱和效应, c_2 项表示在 ω_0 处增益失调效应, \mathcal{E} 是光脉冲的电场, ϕ_0 为光脉冲在谐振腔中每通过一次的恒定相位移, c_1 项包含由于非线性和弥散导致的瞬时延时, a_2 表示群速弥散, a_1 表示有效净增益带宽, b 表示与强度有关的自相位调制参数, ϕ'' 是自相位调制的慢变化部分引起的, ϕ' 与可饱和吸收体折射率的变化有关。我们仍然利用文献[3]的方程组:

$$g_0 \tau^2 - a_1 x^2 - g'' y^2 - 2a_2 x + a_1 = 0 \quad (3)$$

$$g'' y^2 - a_1 x^2 - 3a_2 x + 2a_1 = 0 \quad (4)$$

$$g' y + c_2 x - c_1 = 0 \quad (5)$$

$$\phi \tau^2 + \phi'' y^2 - a_2 x^2 + 2a_1 x + a_2 = 0 \quad (6)$$

$$\phi' y - c_1 x - c_2 = 0 \quad (7)$$

$$a_2 x^2 - \phi'' y^2 - 3a_1 x + b y - 2a_2 = 0 \quad (8)$$

寻求最稳定的飞秒激光器运转条件,利用最优化原理满足这个条件。最优化参数是这样进行的,利用脉宽 τ 的表达式,先求出各个参数在激光器运转当中,对成形光脉冲的贡献量,按照贡献量的大小排成队,选取了前七个贡献量较大的参数:非饱和吸收 A_a , 非饱和增益 A_g , 线性损耗 τ , 与可饱和吸收体 DODOI 染料分子光异构体有关的稳定参数 S_0 , 与 DODOI 基态有关的稳定参数 S_1 , 可饱和吸收体的饱和能量密度 E 。从解方程来看,对于不同的 SPM,只要适当的色散补偿,飞秒激光器可以有很多的运转状态。研究表明,适当地选择稳定参数

$$S_0 = \rho \varepsilon \sigma_0 / \sigma_e = 80 \sim 100 \quad (9)$$

$$S_1 = \rho \varepsilon \sigma_1 / \sigma_e = 4.5 \sim 6.3 \quad (10)$$

得到最佳的非饱和吸收:

$$A_a = -A_0 \exp \left[-\frac{\mathcal{E}}{E} \cdot \frac{S_1}{S_0} \right] \quad (11)$$

并提供必须的 GVD 量 a_2 , 使光脉冲在确定的范围进行啁啾补偿,就能得到最稳定的飞秒激光器运转。(9)式和(10)式中的 σ_0 、 σ_1 及 σ_e 分别是增益介质及 DODOI 的光异构体和基态截面。 ρ 是增益介质中相对于吸收体中光束面积之比, ε 是和吸收体厚度有关的参数。在最初计算中,我们优化出 18 组能获得最短光脉冲运转的激光器参数,见表 1。它给出了当前世界上某些实验室飞秒激光器输出最短的脉宽 τ 。表 1 中的 k_1 、 k_2 和 k_3 是三组参数分别的总贡献, R 表示平均贡献的重要程度。本工作发展了 Martinez 等人的被动锁模理论,表 1 中还给出了与 τ 相应的啁啾量 $\dot{\phi}$ 。顺便指出,能获得某一飞秒输出的激光器运转参数并不是唯一的,还存在有其它运转不太稳定的激光器状态。表 1 中列出了 10 个主要参数。对于某一组确定参数的 OPM 飞秒激光器,为了得到最好最稳定的输出特性,在其它条件、参数确定的条件下,必须进一步研究 SPM 和 GVD 相对于输出脉宽慢变化下的动态平衡关系。具体作法是这样进行的,先分别计算出各个参数对最小脉宽的贡献量,并找出各个参数相对于脉宽变化的曲线,取其最缓慢的变化部分,最后再进行优化处理。研究计算表明,当 GVD 在 -25 fs^2 到 -100 fs^2 内变化时,输出脉宽变化很小,意味着激光器运转在稳定状态之中,光脉冲每次得到的增益和受到的损耗相抵

Table 1 Optimization parameters for CPM lasers

I	A_a	A_p	r	S_0	S_1	a_1 (fs)	E_b (fs)	a_2 (fs ²)	τ (fs)	$\ddot{\phi}$ (fs ⁻² *10 ⁻⁵)
1	.032	.046	.024	80	5.4	17.5	.6	54	41.259	12.101
2	.034	.046	.018	90	4.5	10	.2	23	22.96	50.387
3	.037	.046	.02	100	6.3	25	1.5	118	31.919	13.597
4	.032	.05	.02	100	5.4	10	.2	22	19.158	75.035
5	.034	.05	.024	80	4.5	25	1.5	117	45.151	6.846
6	.037	.05	.018	90	6.3	17.5	.6	53	21.784	44.18
7	.032	.055	.018	100	4.5	25	.6	79	25.007	32.256
8	.034	.055	.02	80	6.3	17.5	.2	27	22.453	70.042
9	.037	.055	.024	90	5.4	10	1.5	57	19.054	31.731
10	.032	.043	.018	80	6.3	10	1.3	34	17.443	39.931
11	.034	.046	.02	90	5.4	25	.6	75	35.249	17.006
12	.037	.046	.024	100	4.5	17.5	.2	37	95.027	3.145
13	.032	.05	.024	90	6.3	25	.2	36	37.002	26.119
14	.034	.05	.018	100	5.4	17.5	1.5	94	22.093	25.039
15	.037	.05	.02	80	4.5	10	.6	37	21.627	37.302
16	.032	.055	.02	90	4.5	17.5	1.5	92	21.951	25.896
17	.034	.055	.024	100	6.3	10	.6	36	17.371	59.265
18	.037	.055	.018	80	5.4	25	.2	36	27.427	49.463
k_1	.297	.448	.251	.322	.426	.216	.411			
k_2	.303	.306	.28	.29	.301	.412	.298			
k_3	.398	.244	.468	.387	.272	.37	.289			
B	.101	.203	.217	.096	.153	.196	.122			

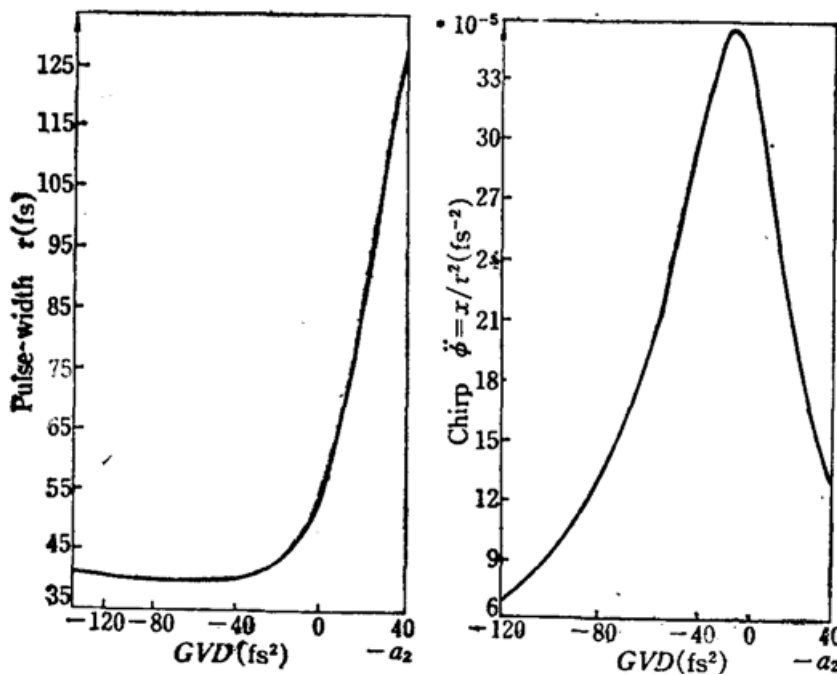


Fig. 1 Pulse width and chirp versus GVD for small SPM. $A_a=0.045$,
 $A_p=0.06$, $r=0.02$, $E_b=10$ fs, $a_1=25$ fs

消, 光脉冲受到的色散正好被啾啾补偿。图 1 是在我们实验室条件下计算得到的理论曲线, 和实验有较好的符合。图 2 是我们计算得到的一种更精确啾啾补偿的高稳定性能的理论曲线, 看

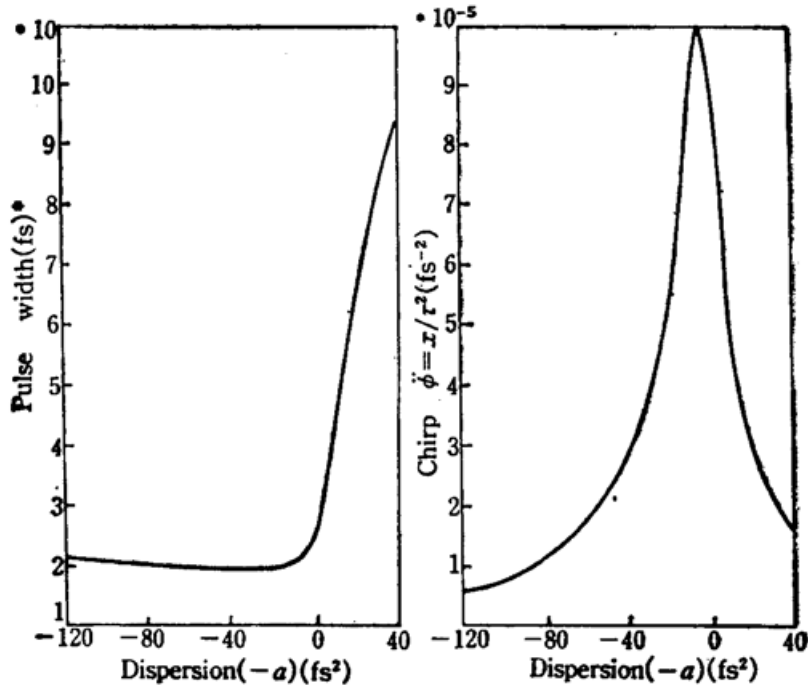


Fig. 2 Pulse width and chirp versus GVD for small SPM. $A_s=0.045$, $A_p=0.06$,
 $r=0.02$, $E_b=8$ fs, $a_1=12$ fs

出要得到平均脉宽为 20 fs 的高稳定度飞秒激光器运转, 啾啾补偿必须非常精确, 其脉宽要比图 1 的 ~ 40 fs 脉宽短一倍, 它的啾啾补偿量需精确近 10 倍。

三、实验研究

我们在原有飞秒激光器的基础上, 改进色散补偿能力和腔镜的膜系设计, 控制自相位调制, 改变腔镜间夹角引起的色散。当激光器运转在稳定状态情况下, 利用强度自相关仪测量脉宽,

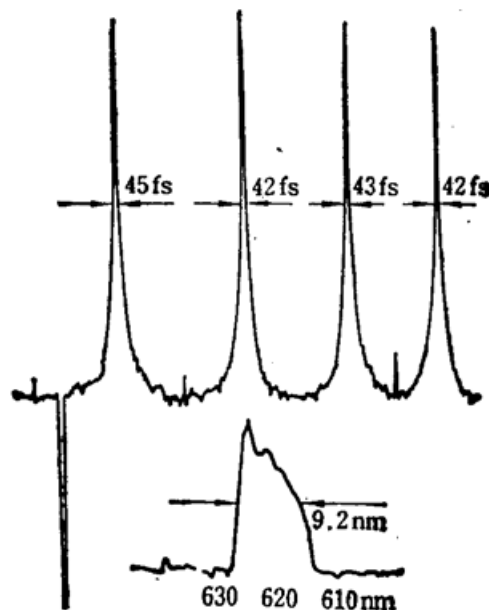


Fig. 3 Autocorrelation trace and spectrum of pulses from the CPM laser

镜,在此一并表示感谢。

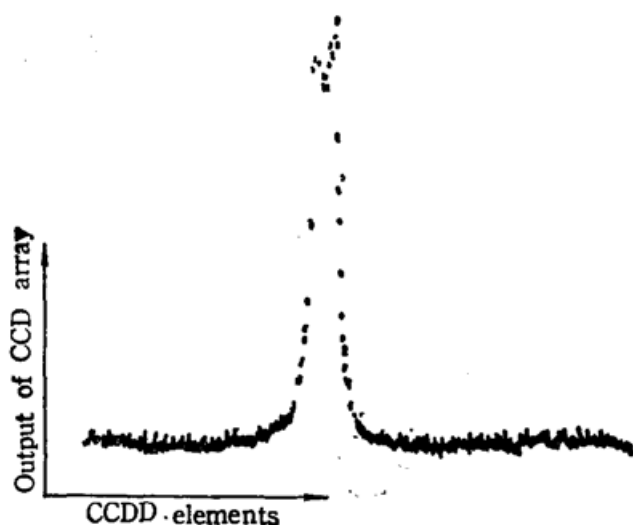


Fig. 7 Far field profile of the unstable resonator Nd:YAG laser with variable reflectivity coupler. The laser beam is focused by a lens ($f=3.98\text{m}$), and measured by RL1024G CCD array

参 考 文 献

- 1 A. E. Siegman, H. Y. Miller, *Appl. Opt.*, **9**, 2729 (1970)
- 2 A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, 1986, 858~922
- 3 H. Zucker, *The Bell System Tech. Journal*, **11**, 2349 (1970)
- 4 Y. A. Anan'ev, V. E. Sherstobitov, *Sov. J. Quant. Electr.*, **1**, 263 (1971)
- 5 C. Zizzo, C. Arnone, *Opt. Lett.*, **13**(5), 332 (1985)
- 6 Kevin S. Snell, Nathalie Mc Cathy, Michel Piche', *Opt. Commun.*, **5**(5), 377 (1988)
- 7 方洪烈, 光学谐振腔理论, 科学出版社, 1981, 240~259
- 8 Hecht Zajac, *Optics*, 1974, 329~392

(上接第 894 页)

利用单色仪及 OMA-II 光学多道分析仪测量脉冲光谱。相关仪中的非线性晶体 KDP 的厚度小于 0.2 mm, 两臂全反射镜采用金属高反射膜, 50% 分束器的基底是一块厚度为 0.8 mm 的石英片。强度自相关仪的测量精度约 1 fs, 利用数字激光能量功率计测量输出功率。利用 $x-y$ 记录仪得到的光脉冲相关曲线(见图 3)。激光器输出的平均脉宽为 43 fs, 其中心波长为 624 nm, 输出平均功率为 20 mW, 脉宽不稳定性为 $\pm 3.3\%$ 。

利用高精度计数器测得频率的变化约 15 Hz, 激光器输出重复频率 100 MHz 的光脉冲, 故频率不稳定性小于 10^{-6} 。实验结果与理论计算符合得很好。

作者衷心感谢史珂, 蔡金星等同志对本工作的具体帮助。

参 考 文 献

- 1 R. L. Fork, B. I. Greene *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 671 (1981)
- 2 J. A. Valdmanis, R. L. Fork *et al.*, *Opt. Lett.*, **10**, 131 (1985)
- 3 M. D. Dawson, T. F. Boggess *et al.*, *Ultrafast Phenomena V*, 5 (1986)
- 4 F. M. Mitschke, L. F. Moldenauer, *Ultrafast Phenomena V*, 58 (1986)
- 5 S. O. Wang, G. Chen *et al.*, *SPIE*, **1032**, 457 (1988)
- 6 王水才, 程 昭 *et al.*, *激光技术*, **13**(5), 1 (1989)
- 7 Shuical Wang, Ke Shi *et al.*, *SPIE*, **1155**, 511 (1989)