

## 45 fs 光脉冲的产生和测量\*

王水才 程 昭 钱建生 蔡金星

(中国科学院西安光机所)

**摘要:** 本文报道了由CPM飞秒激光器产生的45fs光脉冲, 最优化激光器设计提供了稳定可靠的激光器运转, 还报告了激光器的各种参数。

## Generation and measurement of 45 fs light pulses

Wang Shuicai, Cheng Zhao, Qian Jiansheng, Cai Jinxing

(Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** We report the generation of 45 fs light pulses from the CPM femtosecond laser. The optimized laser design provides the steady and reliable laser operation. Laser parameters are also reported.

## 一、前 言

近年来, 随着超短激光技术迅速发展, 研究光物理、光化学、化学反应动力学、等离子物理、表面物理、半导体物理、光生物学等学科中的超快速现象, 已经成为非常活跃的热门工作。因而对超短光脉冲激光器有了进一步的要求, 能产生稳定的fs光脉冲。我们为了瞬态光学现象的研究, 希望不破坏样品, 采用了同步重复扫描诊断技术, 要求有100MHz的重复频率、 $<10^{-6}$ 的稳定度, 能量近于 $10^{-9}$ J, 在可见光范围内约几十fs光脉冲。经过最佳动力学设计, 平衡了自相位调制、群速弥散、饱和吸收和饱和增益, 进行啁啾脉冲补偿, 很好地满足了要求。

## 二、内腔弥散动态补偿

在对撞脉冲环型染料激光谐振腔内, 存在着多层电介质膜反射镜和饱和吸收体及增益介质, 当腔内存在小于100fs的光脉冲传播时, 各种弥散效应对光脉冲产生频率啁啾作用, 输出光脉冲持续期将展宽为:

\* 本文是1988年在中国光学学会量子电子学陕西省年会上的报告。

$$\tau_{\text{出}} = \tau_{\text{入}} \left( 1 + \frac{\ddot{\phi}^2}{4\beta} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $\tau_{\text{出}}$ 为输出光脉冲;  $\tau_{\text{入}}$ 为未啾啾光脉冲宽度 (FWHM);  $\beta = \tau_{\text{入}}^2 / (8 \ln 2)$ ;

$\ddot{\phi} = d^2\phi/d\omega^2$ 为相移 $\phi(\omega)$ 对频率的二次微分。

由分析知道, 在可饱和吸收体内将产生自相位调制, 同样放大介质也会有正负弥散, S. D. Silvestri等人计算了Rh6G, DODCI和它的光异构体的色散随波长的变化<sup>[1]</sup>, 如果我们能够让激光器输出激光束波长在620nm附近, 这两种染料溶液将对附加弥散产生较小的贡献。只要选择饱和增益及饱和吸收有合适的值, 就可以通过调节光束的聚焦及喷膜离焦点的位置进行自相位调制。多层电介质反射镜也会产生多次反射波的相移 $\phi(\omega)$ , 其相移与激光频率有

关, 相移的二次微分 $\ddot{\phi}(\omega)$ 将对腔弥散有所贡献。可以设计这样的膜系, 使激光束的反射率和相移的二次微分随着频率左移或右移变化, 达到动态补偿弥散。我们设计了最少腔镜的六个反射镜的对撞脉冲锁模环型谐振腔, 见图1。

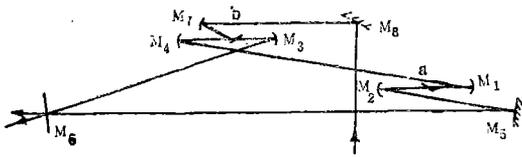


图1 六腔镜激光谐振腔

单堆膜系, 中心波长6200 Å, 反射系数均大于99.8%。M<sub>5</sub>曲率半径1.1m, 双堆垂直入射镀膜, 反射系数大于99.8%。输出镜M<sub>6</sub>也为双堆垂直入射, 在激光波长处透过率为2.5%。总的腔长3m, 两喷嘴相距0.75m, 用氩离子激光器

泵浦, Rh6G乙二醇增益喷膜厚约170 μm, DODCI乙二醇饱和吸收喷膜厚约50 μm。所有激光器谐振腔安装在一个防震台上。激光器的运转参数可由未啾啾光脉冲附加相移的变化而得到, 如果光脉冲电场为

$$e(t) = v(t) \exp\{i[\omega_0 t + \phi(t)]\} \quad (2)$$

式中,  $\omega_0$ 为中心频率,  $\phi(t)$ 是慢变化相移,  $v(t)$ 是归一化的实数, 脉冲能量密度为:

$$e' = \int_{-\infty}^t v(t')^2 dt' \quad (3)$$

对(2)式经过算符运算得到:

$$\begin{aligned} & (g_0 + g' e + g'' e^2 - a_1 c^2 e^2 + c_2 c e + c_1 \frac{d}{dt} + 2a_2 c e \frac{d}{dt} + a_2 c v^2 \\ & + a_1 \frac{d^2}{dt^2}) v(t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & (\phi_0 + \phi' e + \phi'' e^2 - a_2 c^2 e^2 - c_1 c e + c_2 \frac{d}{dt} - 2a_1 c e \frac{d}{dt} \\ & + (b - a_1 c) v^2 + a_2 \frac{d^2}{dt^2}) v(t) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

(4)式和(5)式中的符号:  $g_0$ 是 $\omega = \omega_0$ 时的增益,  $g'$ 和 $g''$ 表明增益饱和效应,  $c_2$ 项表明在 $\omega_0$ 处增益失调效应,  $a_1$ 确定了有效净增益带宽,  $\phi_0$ 为恒定相移,  $\phi'$ 和 $\phi''$ 为吸收体饱和引起的折射率的变化,  $c_1$ 包含了固定的延时,  $a_2$ 表明群速弥散,  $b$ 表征与内腔有关的相应变化或者自相位调制。通过运算得到方程(4)和(5)的特解:

$$\nu(\xi) = \left(a \frac{\varepsilon}{\tau}\right)^{1/2} \operatorname{sech}\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (6)$$

式中,  $a$ 是与饱和吸收截面、喷膜厚度、激光脉冲中心频率等参数有关的参数,  $\varepsilon$ 是光脉冲能量,  $\tau$ 为脉冲宽度, 其相移为:

$$\phi(t) = x \ln|\nu(t)| \quad (7)$$

将(6)、(7)式代入(2)式, 得到一组代数方程, 并且利用净增益与能量有关, 应用<sup>[2]</sup>

$$g = a_0 e^{-u/s_0} - a_0 e^{-u \cdot s_1/s_0} - \gamma \quad (8)$$

式中,  $a_0$ 为非饱和增益,  $a_0$ 是非饱和吸收,  $\gamma$ 为总的线性损耗,  $u = \nu' / \varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0$ 是吸收体饱和能量密度,  $s_1$ 是饱和吸收体DODCI基态稳定参数,  $s_0$ 为DODCI光异构体稳定参数。通过计算机统计规律最佳优化处理, 获得激光脉宽和啁啾同弥散量的函数关系, 见图2。我们设计了双堆和单堆多层电介质膜反射镜, 用多层电介质膜反射镜产生的内腔弥散能够由正值到负值的变化, 因而能有效的进行脉冲啁啾补偿。图2计算最佳参数为:  $a_0 = 0.05$ ,  $a_0 = 0.06$ ,  $\gamma = 0.015$ ,  $a_2 = -40fs$ ,  $a_1 = 17.5fs$ ,  $b\varepsilon_0 = 1fs$ 。

这里忽略了自相位调制的缓慢部分, 或者说是在小的自相位调制下计算的。

### 三、fs激光器参数测量系统

最主要的测量系统是强度自相关二次函数测量仪和光谱测量系统。激光器输出的光脉冲经过反射镜 $M_0$ 反射, 再由半反射镜 $M_{11}$ 分束器分成两束, 透过光束经 $M_{11}$ 返回, 反射光束由 $M_{12}$ 返回, 这两块反射镜均由金属蒸发镀膜而成。进入透镜 $L$ 的两束光, 在用马达带动 $M_{12}$ 前后移动改变光束相对时延的情况下, 进入非线性晶体KDP, 产生二次谐波, 用GDB-126光电倍增管转换, 用X-Y记录仪记录脉冲的相关函数:

$$G(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I(t) \cdot I(t-\tau) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} I^2(t) dt} \sim K \int [e^4(t) + e^4(t-\tau) + 4e^2(t) \cdot e^2(t-\tau)] dt \quad (9)$$

KDP晶体厚度 $\leq 0.2mm$ 。用光栅单色仪与OMA-2光学多道分析器同时实时测量脉冲光谱, 用激光能量功率计同时测量激光功率, 整个实验用485示波器检视。其测量系统见图3, 图

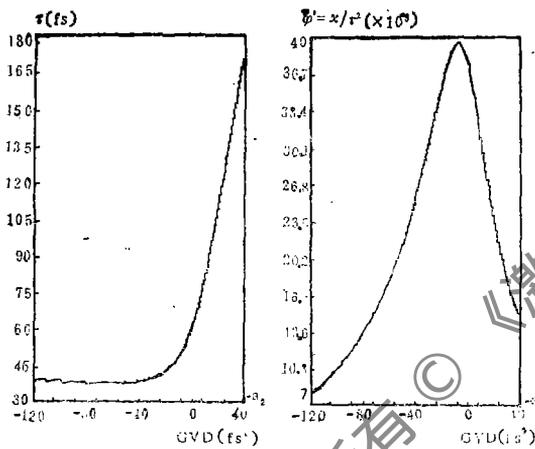


图2 脉宽和啁啾随群速弥散变化

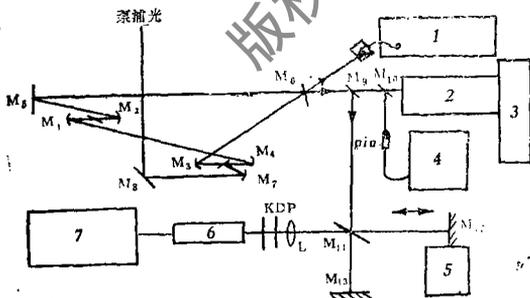


图3 CPM fs激光器参数测量系统

- 1—激光能量功率计
- 2—光栅单色仪
- 3—OMA-2光学多道分析器
- 4—485型示波器
- 5—马达
- 6—GDB-126光电倍增管
- 7—X-Y记录仪

4是用示波器获得的fs激光器连续锁模状态照片,没有任何间断状态,说明CPM(Colliding pulse Mode-locked) fs 激光器完全运转在最佳连续锁模状态。测得输出光脉冲的强度相关函数曲线见图5,其相应的光谱曲线见图6。激光脉宽为45fs,相应的光谱宽度为9.2nm,时间带宽乘积为0.310左右,其理论值为0.315(设为Sech<sup>2</sup>强度脉冲轮廓)。由图4知道,峰值与背景之比接近3:1。说明锁模状态是非常好的。激光中心波长约在622nm,是处于设计预料的最佳状态。激光器输出平均功率17mW,其功率稳定度小于2%,频率稳定度好于10<sup>-8</sup>。目前激光器正用于fs光谱、化学反应

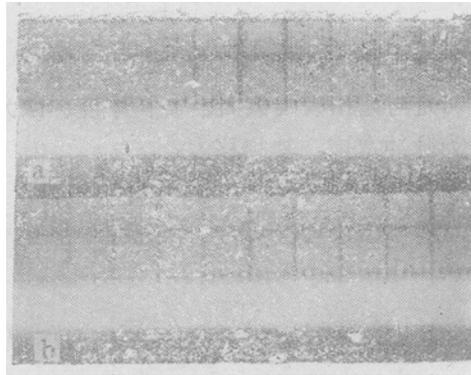


图4 CPMfs激光器连续锁模运转输出脉冲示波器照片

a—示波器时标0.1μs/div b—示波器时标5ms/div

动力学研究。激光器已经稳定运转二年多。

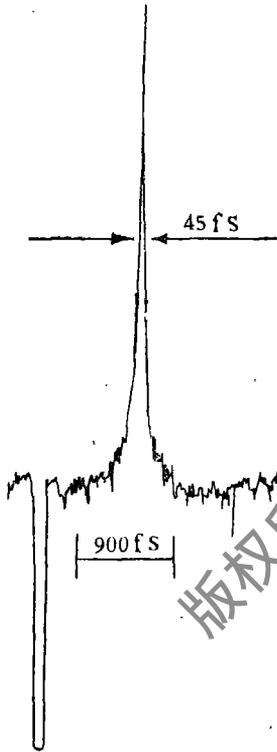


图5 相关函数曲线

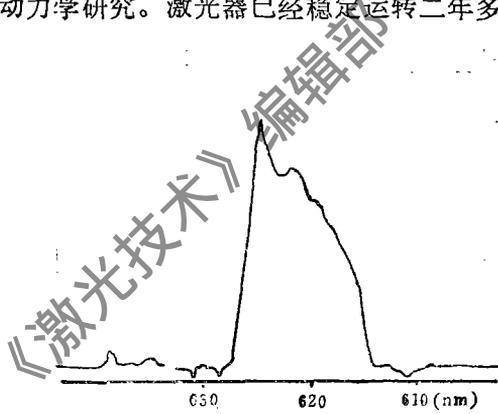


图6 相应 fs 的光谱

#### 参 考 文 献

- [1] IEEE J.Q.E.,1984, Vol. QE-20, No.5, P.533.
- [2] Opt.Lett.,1984, Vol.9, No.5, P.156.

\* \* \*

作者简介:王水才,请参阅本刊1987, Vol.11, No.6, P.5.

程 昭,男,1965年出生,硕士研究生。

钱建生,男,1965年出生,硕士研究生。

蔡金星,男,1968年出生,硕士研究生

收稿日期:1989年5月27日。