

亚 10 飞秒脉冲的诊断与压缩^{*}

邓 莉 廖 睿 刘叶新 寿 倩 文锦辉 林位株

(中山大学光电子材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(中山大学物理系, 广州 510275)

(2002 年 9 月 23 日收到, 2002 年 12 月 22 日收到修改稿)

采用二次谐波-频谱分辨光闸法对克尔透镜锁模钛宝石激光器输出的飞秒脉冲的振幅和相位进行诊断, 测得其脉冲包络是双曲正割型的, 而相位则近似为时间的三次幂形式. 通过对脉冲频域相位的拟合, 诊断出二阶群速度色散是造成脉冲啁啾、导致脉冲展宽的主要原因. 利用棱镜对补偿二阶群速度色散, 进一步将 17 fs 啁啾脉冲压缩至半高全宽为 8.5 fs 的近似转换极限脉冲.

关键词: 飞秒脉冲, 二次谐波-频谱分辨光闸法, 群速度色散

PACC: 4280W, 4260F

1. 引 言

如何诊断飞秒脉冲的啁啾特性并进行有效的补偿, 是超短脉冲压缩的关键问题. 飞秒脉冲啁啾的产生源于激光器腔内增益介质的自相位调制和增益介质及各种色散元件的群速度色散对脉冲相位的影响, 因此了解飞秒脉冲的振幅和相位信息, 就可以对脉冲进行诊断并进行有效的补偿^[1,2], 获得短的飞秒脉冲.

本文采用频谱分辨光闸(FORG)方法中的二次谐波-频谱分辨光闸(SHG-FROG)方法^[3,4], 测量克尔透镜锁模(KLM)钛宝石激光器输出的飞秒脉冲的振幅和相位, 测得频带宽度为 93 nm 的脉冲光的半高全宽(FWHM)为 17 fs, 其包络的形状是双曲正割型的, 相位近似为时间的三次幂形式. 说明此时测得的脉冲是带有啁啾的非转换极限脉冲. 对飞秒脉冲的时域复振幅进行傅里叶变换, 得到脉冲的频域复振幅, 通过对其相位的拟合, 确认色散介质的二阶群速度色散是引起脉冲啁啾, 导致脉冲展宽的主要原因. 利用棱镜对具有补偿二阶、三阶群速度色散的特点, 对飞秒脉冲进行腔外补偿压缩, 成功地将 FWHM 为 17 fs 的啁啾飞秒脉冲压缩至 8.5 fs 的近似转换极限脉冲.

2. 理 论

飞秒脉冲的电场部分可以表示为

$$E(t) = \tilde{E}(t) \exp[-i(\omega_0 t - k \cdot r)], \quad (1)$$

式中 ω_0 为中心载波频率, k 为波矢, $\tilde{E}(t)$ 为脉冲的时域复包络,

$$\tilde{E}(t) = |E(t)| \exp[i\varphi(t)], \quad (2)$$

式中 $\varphi(t)$ 为输出脉冲的相位. 飞秒脉冲的频域复包络为

$$\tilde{E}(\omega) = |E(\omega)| \exp[i\phi(\omega)]. \quad (3)$$

它与飞秒脉冲的时域复包络互为傅里叶变换关系.

飞秒脉冲的振幅 $|E(t)|$ 、相位 $\varphi(t)$ 可以利用 SHG-FROG 方法进行测量分析. SHG-FROG 实验测量系统是建立在传统自相关仪的基础上的, 装置如图 1 所示. KLM 钛宝石激光器产生的飞秒激光脉冲, 经两棱镜对组成的腔外补偿系统, 经分束器分成两束强度相同的光束, 其中一束通过可变光学延迟线, 再和另一脉冲一起经透镜会聚在倍频晶体 KDP 中, 产生 SHG-FROG 信号. 利用光电探测器探测自相关信号, 以确保两束光在时间和空间上能够重合, 并通过自相关信号来选取测量 SHG-FROG 迹线的最佳延迟时刻, 单色仪记录下 SHG-FROG 迹线^[5].

^{*} 国家自然科学基金(批准号 60178020, 69888005, 10274107)及广东省自然科学基金(批准号 011201, 2002B1160)资助的课题.

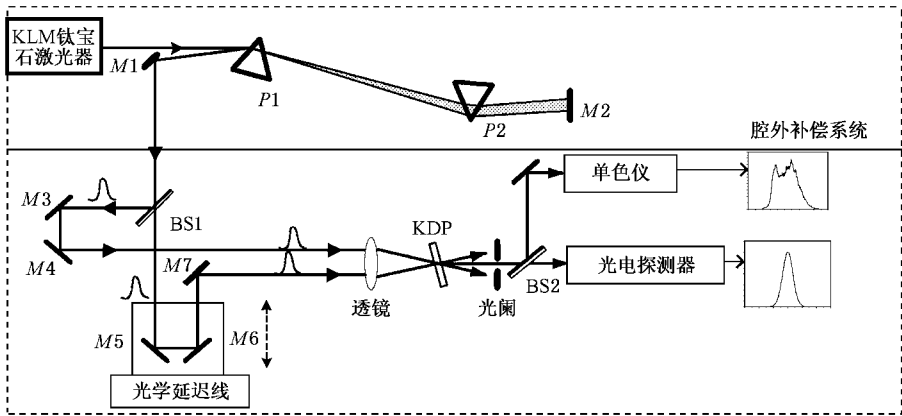


图 1 SHG-FROG 方法的实验装置图 M 为反射镜, P 为补偿棱镜, BS 为分束器

SHG-FROG 迹线,是在不同延迟时刻,强度自相关信号的频谱沿延迟时间轴的分布. 根据对自相关理论公式的分析可以得到 SHG-FROG 信号包络的表达式. 将强度自相关的函数形式写为

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t-\tau)dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(t)\tilde{E}^*(t)\tilde{E}(t-\tau)\tilde{E}^*(t-\tau)dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} ([\tilde{E}(t)\tilde{E}(t-\tau)] \\ &\quad \times [\tilde{E}(t)\tilde{E}(t-\tau)]^*) dt. \end{aligned} \tag{4}$$

SHG-FROG 信号包络表达式为

$$E_{\text{sig}}(t,\tau) = \tilde{E}(t)\tilde{E}(t-\tau). \tag{5}$$

从(4)(5)式可以看出强度自相关信号是 SHG-FROG 信号强度的时间积分,其中 $\tilde{E}(t)$ 是待测飞秒脉冲的复包络, $\tilde{E}(t-\tau)$ 是光闸开关脉冲的复包络, τ 是两飞秒脉冲之间的延迟时间. SHG-FROG 频域迹线表示为

$$\begin{aligned} I_{\text{FROG}}(\omega,\tau) &= \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{sig}}(t,\tau)\exp(i\omega t) dt \right|^2 \\ &= |E_{\text{sig}}(\omega,\tau)|^2. \end{aligned} \tag{6}$$

SHG-FROG 迹线 I_{FROG} 是频率 ω 和延迟时间 τ 的函数. 通过实验测量 SHG-FROG 迹线 $I_{\text{FROG}}(\omega,\tau)$, 求解信号包络 $E_{\text{sig}}(t,\tau)$,再由(5)式求出脉冲的时域复振幅 $\tilde{E}(t)$,这是图像处理技术中二维相位恢复的问题. 利用归一化的 Gerchberg-Saxton 算法,可以

获得唯一解^[6]. 归一化的 Gerchberg-Saxton 算法的基本迭代思想如图 2 所示. 对脉冲先作一个初始猜测 $\tilde{E}(t)$,可由(5)式得出不同延迟时刻 τ 在时间轴上的二次谐波信号 $E_{\text{sig}}(t,\tau)$,再对 $E_{\text{sig}}(t,\tau)$ 作 t 的快速傅里叶变换(FFT),得初始猜测脉冲的 $E_{\text{sig}}(\omega,\tau)$, $E_{\text{sig}}(\omega,\tau)$ 的模即为猜测脉冲的 FROG 迹线的方根值. 保留其相位值,以待测脉冲的实验 FROG 迹线方根值代替其振幅,得到 $E'_{\text{sig}}(\omega,\tau)$,此过程称为频域限制. 再经逆快速傅里叶变换(IFT)得到一个新的二次谐波信号 $E'_{\text{sig}}(t,\tau)$,此信号由于经过了频域限制,显然更接近待测二次谐波信号. 再通过时域限制过程,满足(5)式限制的新 $\tilde{E}(t)$ 作为下次迭代的初始脉冲. 因此,由实验测得的 SHG-FROG 迹线可以唯一地确定待测飞秒脉冲的振幅和相位信息.

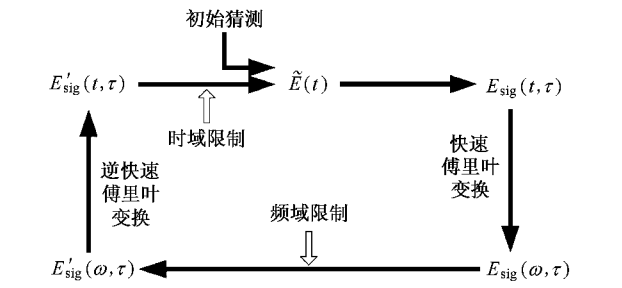


图 2 归一化的 Gerchberg-Saxton 算法

由飞秒激光器输出的脉冲往往带有啁啾,同时经过激光器耦合输出镜和测量系统时,光学元件的色散亦导致脉冲的展宽和变形,因此需要对脉冲进行补偿和压缩. 设脉冲沿 z 轴的方向传播,脉冲的频域复振幅表示为

$$\tilde{E}(z, \omega) = \tilde{E}(\omega) \exp(ikz), \quad (7)$$

式中 k 为波矢,在介质中也称为传播常数

$$k(\omega) = \frac{n(\omega)\omega}{c}.$$

由于介质存在色散,将 k 在中心载波频率 ω_0 处进行泰勒级数展开^[7],

$$k(\omega) = k_0 + k_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}k_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}k_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots, \quad (8)$$

其中 $k_n = \left[\frac{d^n k(\omega)}{d\omega^n} \right]_{\omega=\omega_0}$, 为 n 阶的群速度色散参

量,由于飞秒脉冲的频谱宽度较宽 ($\omega - \omega_0$) 不再远小于 ω_0 , 光学元件介质的高阶群速度色散对脉冲相位的影响不能忽略. 实际上, k_2 造成脉冲的啁啾, 而 k_3 则引起脉冲变形. 将 (8) 式代入 (7) 式, 进行逆傅里叶变换得到飞秒脉冲的时域复包络 $E(z, t)$, 由强度自相关公式 (4), 得出理论的强度自相关曲线, 通过拟合实验的强度自相关曲线, 可以定量判断 k_n 对脉冲的影响, 从而了解飞秒脉冲啁啾的来源, 为补偿群速度色散, 进一步压缩飞秒脉冲提供依据.

3. 实 验

图 3 所示的曲线, 是 KLM 钛宝石激光器输出的飞秒脉冲的功率频谱, 中心波长为 755 nm, 频谱 FWHM 为 93 nm, 重复率为 10^8 Hz, 平均功率为 300 mW. 功率频谱呈现多峰结构, 这是自相位调制和群速度色散在钛宝石晶体中相互作用的结果^[8,9]. 非线性光学晶体采用 KDP 晶体, 其厚度为 0.3 mm, 两光束偏振方向相同, 采用第一类相位匹配. 为了使 SHG-FROG 迹线准确反映基频光的性质, 倍频晶体的转换效率应小于 3%^[3], 同时, 由于相位匹配带宽的限制, 需要尽量减小倍频晶体的厚度, 并采用频带限制较宽的 KDP 晶体. 尽管如此, 部分基频光的信息经倍频后仍会丢失, SHG-FROG 方法测量的脉冲振幅和相位存在一定的误差.

图 4 是在图 3 所示激光功率频谱的条件下, 未仔细进行群速度色散补偿时, 利用 SHG-FROG 方法测得的此飞秒脉冲的强度和相位. 脉冲的包络是双曲正割型的, 相位近似为时间的三次幂形式, 线性啁啾参数为 2.2, 脉冲强度的 FWHM 明显大于转换极限脉冲宽度, 这是由色散介质的群速度色散所引起的. 由图 4 得到基频光的复振幅 $\tilde{E}(t)$, 并由它得到

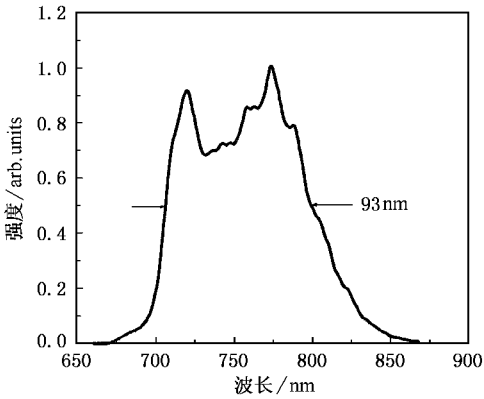


图 3 KLM 钛宝石激光器输出的飞秒脉冲的功率频谱
中心波长为 755 nm, 频谱宽度为 93 nm

脉冲频域复振幅的强度和相位, 再经多项式拟合脉冲频域复振幅的相位曲线, 得到二阶群速度色散 $k_2 z = 15.85 \text{ fs}^2$. 说明正的二阶群速度色散是产生脉冲啁啾的主要原因.

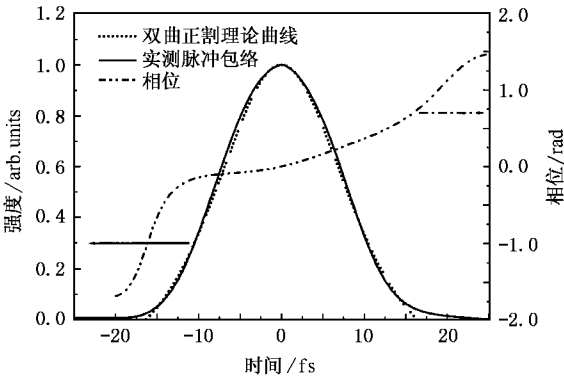


图 4 采用 SHG-FROG 方法测得的脉冲的振幅(实线)和相位(点划线) 脉冲 FWHM 为 17 fs, 实线为实验测得的脉冲包络, 点线为双曲正割理论曲线, 点划线为相位

为了得到更短的飞秒脉冲, 可以利用布拉格光栅、啁啾镜、棱镜对等元件来补偿由于群速度色散引起的啁啾^[10]. 我们在实验中采用棱镜对压缩飞秒脉冲, 如图 1 所示. 棱镜的顶角为 68° , 两棱镜顶角间距为 72 cm. 石英棱镜对所提供的二阶和三阶群速度色散补偿量与棱镜沿其顶角平分线移动距离 Δs (以 μm 为单位) 的关系(对 755 nm 波长)为^[11,12]

$$\begin{aligned} \Delta k_2 z &= 0.039 \Delta s (\text{fs}^2), \\ \Delta k_3 z &= -0.048 \Delta s (\text{fs}^3). \end{aligned} \quad (9)$$

根据 (9) 式, 使棱镜沿其顶角平分线退出光束约 0.4 mm, 以得到 -16 fs^2 的二阶群速度色散补偿量. 这时, 脉冲的前后沿被压缩, 脉冲宽度也随之变窄, 如

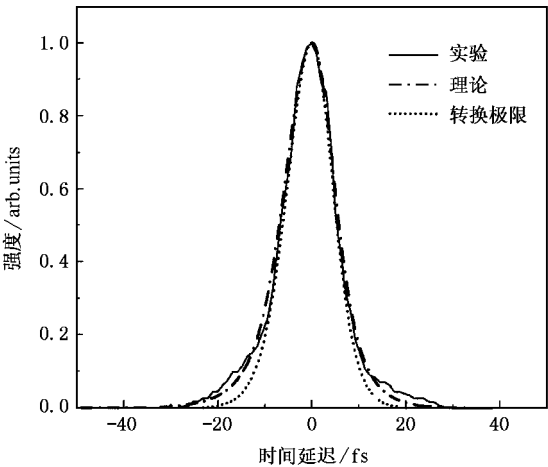


图 5 FWHM 为 8.5 fs 脉冲的自相关曲线 实线为实验测得的曲线,点划线为三阶群速度色散参量取 $\Delta k_3 z = 34 \text{ fs}^3$ 的理论拟合曲线,点线为 FWHM 为 8.5 fs 转换极限脉冲的理论强度自相关曲线

图 5 实线所示,其 FWHM 为 8.5 fs,脉冲强度自相关曲线与转换极限脉冲的情况(点线所示)比较,符合得较好,但脉冲底座有所增高.由(9)式可以看出,棱镜对在补偿二阶群速度色散的同时,亦引入了正的三阶群速度色散($\Delta k_3 z = 19 \text{ fs}^3$),导致脉冲底座增

高.这部分由棱镜对引入的三阶群速度色散再加上脉冲原有的三阶群速度色散导致了脉冲底座的升高.若在转换极限脉冲的理论曲线中加上三阶群速度色散参量 $\Delta k_3 z = 34 \text{ fs}^3$,则带有三阶群速度色散的理论曲线(点划线)与实验曲线符合较好.这说明进一步压缩脉冲,需要补偿三阶以上的群速度色散,仅仅采用棱镜对补偿是不够的,需要引入其他的补偿手段如光栅对、啁啾镜等.

4. 结 论

采用 SHG-FROG 方法测得 KLM 钛宝石激光器输出的频带宽度为 93 nm 的脉冲光,其包络的形状是双曲正割型的,相位近似为时间的三次幂形式.通过对实验自相关曲线的分析,诊断出此飞秒脉冲的啁啾,主要是由二阶群速度色散引起的.利用棱镜对具有补偿二阶群速度色散的特点压缩脉冲,得到了 FWHM 为 8.5 fs 的亚 10 飞秒脉冲,但同时引入了三阶群速度色散,致使脉冲的底座增高.进一步消除脉冲底座,得到完全转换极限脉冲,则需要引入高阶色散补偿元件.

[1] Wu J *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 619 [in Chinese] 伍 剑等 1998 物理学报 **47** 619]

[2] Wu Y *et al* 2002 *Chin. Phys.* **11** 578

[3] Delong K W , Trebino R , Hunter J *et al* 1994 *J. Opt. Soc. Am. B* **11** 2206

[4] Trebino R , Kane D J 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 1101

[5] Kane D J , Trebino R 1993 *Opt. Lett.* **17** 823

[6] Fienup J R 1982 *Appl. Opt.* **21** 2758

[7] Marcuse D 1980 *Appl. Opt.* **19** 1653

[8] Zhang R B *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 765 [in Chinese] 章若冰等 2000 物理学报 **49** 765]

[9] Yang H *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1292 [in Chinese] 杨 宏等 2000 物理学报 **49** 1292]

[10] Fork R L , Brito Cruz C H , Becker P C *et al* 1987 *Opt. Lett.* **12** 483

[11] Fork R L , Martinez O E , Gordon J P 1984 *Opt. Lett.* **9** 150

[12] Gordon J P , Fork R L 1984 *Opt. Lett.* **9** 153



Diagnostics and compression of sub-10 femtosecond laser pulses^{*}

Deng Li Liao Rui Liu Ye-Xin Shou Qian Wen Jin-Hui Lin Wei-Zhu

(*State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China*)

(*Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China*)

(Received 23 September 2002 ; revised manuscript received 22 December 2002)

Abstract

The amplitudes and phases of femtosecond pulses generated from a home-made KLM Ti : Sapphire laser are diagnosed by using the technique of second-harmonic generation frequency-resolved optical gating. The results indicate that the profiles of the pulses are sech^2 shapes and the phases are approximately cubic dependent of the time. The chirped pulses of 17 fs (FWHM) are compressed to near Fourier transform limited pulses of 8.5 fs with a double-prism system to compensate for the second-order dispersion.

Keywords : femtosecond pulses , method of second-harmonic generation frequency-resolved optical gating , group velocity dispersion

PACC : 4280W , 4260F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60178020 , 69888005 and 10274107) , and the Natural Science Foundation of Guangdong Province , China (Grant No. 011201 and 2002B1160) .