

# 利用激光感应瞬态光栅技术测量 超短激光脉冲宽度\*

杨延强 费浩生 艾希成 韩 力 魏振乾

(吉林大学物理系, 长春 130023)

**摘 要** 描述了利用激光感应瞬态光栅技术测量超短脉冲激光的脉冲宽度和相干时间的方法. 来自同一光源的两束激光在非线性介质中相干形成积分光栅, 测量光栅自衍射强度与两束光脉冲之间的延迟时间关系, 利用相干光束的四阶相干函数关系, 可以求出光源的脉冲宽度和相干时间.

**关键词** 超短脉冲激光, 自衍射, 激光感应瞬态光栅.

## 1 引 言

近 10 年来, 超短脉冲激光技术得到了飞速发展, 人们已经可以得到从红外到紫外波段脉宽为 fs 量级的超短脉冲激光, 从而推动了超快速光谱学及超快速过程的研究<sup>[1~3]</sup>. 与此相应, 超短脉冲激光宽度的测量及其光束特性的表征也受到人们的重视. 超短脉冲宽度测量最常用的方法是双光子荧光(TPF)方法和二次谐波(SHG)方法. 双光子荧光方法虽然方法较简单, 但由于它有很强的荧光背景, 测量精度较低, 测量的时间分辨一般低于 1 ps; 二次谐波方法利用被测激光在非线性晶体中的相关强度, 可以同时得到超短激光脉冲的脉冲宽度和光束相干特性的信息, 脉冲宽度测量精度可达 fs, 但它受到非线性晶体透过波段的影响<sup>[4~6]</sup>. 条纹相机是实时测量超短脉冲激光宽度的理想工具, 由于它受到光电阴极光谱响应和响应速度的限制, 可测激光波长限制在可见至红外区, 目前只能测量 ps 量级的超短光脉冲<sup>[7]</sup>, 而且条纹相机价格昂贵, 一般实验室不易得到.

本文报道一种实验装置较简单且可以实现 ps 至 fs 量级的超短光脉冲测量的方法——自衍射法. 来自同一光源的两束激光以某一夹角入射至一非线性光学介质, 由于这两束光在介质中相互干涉而形成光强的空间调制, 从而使非线性介质折射率也相应地受到调制, 形成所谓激光感应光栅, 它将使入射的两束光产生衍射, 即所谓光束自衍射. 如果在入射的两束光脉冲之间引入一可变延迟, 则被感应光栅所衍射的衍射光强度与延迟时间有关. 测量该衍射光强与延迟时间的关系可以得到被测激光脉冲的脉冲宽度和相干特性.

\* 国家自然科学基金和科学院激发态物理开放实验室资助项目.

收稿日期: 1993 年 1 月 18 日; 收到修改稿日期: 1993 年 7 月 5 日

## 2 基本原理

设两准单色平面波

$$E_i(\mathbf{r}, t) = \text{Re } E_i(t) \exp i(\omega t - \mathbf{K}_i \cdot \mathbf{r}) \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

在介质中以某一角  $\theta$  相交, 则由于两束单色光的相干在空间形成一强度调制的空间光强

$$I(t, \mathbf{r}) = I_1 + I_2 + 2\Delta I \exp(-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) \quad (2)$$

$$\Delta I = (n/2) \epsilon_0 E_1(t) E_2(t)$$

(1)、(2)式中的  $E_i(t)$  为光场的缓变复振幅,  $I_i(t)$  为光强,  $n$  为介质折射率,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\mathbf{q}$  为调制光场的波矢

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 \quad (3)$$

非线性介质在调制光场的作用下, 将产生折射率调制, 即形成折射率光栅<sup>[8]</sup>

$$\Delta n = \chi^{(3)} E_1(t) E_2^*(t) \exp(-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) \quad (4)$$

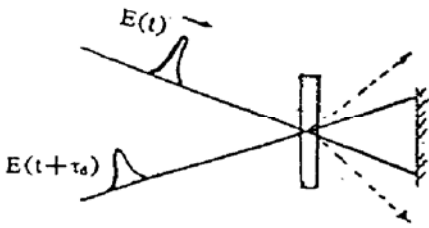


Fig. 1 Self-diffraction arrangement

该折射率光栅使两入射相干光产生衍射, 产生如图 1

所示的自衍射, 其衍射效率  $\eta$  与入射光强度的关系为<sup>[9]</sup>

$$\eta \propto \left| \int_{-\infty}^t E_1(t) E_2^*(t) dt \right|^2 = \int_{-\infty}^{t_2} \int_{-\infty}^{t_1} E_1(t_1) E_2^*(t_1) E_1^*(t_2) E_2(t_2) dt_1 dt_2 \quad (5)$$

$$E_i(t) = E_i A_i(t) u_i(t)$$

式中  $E_i$  为入射至介质的光场场强的大小,  $A_i(t)$  是光场的归一化的时间包络函数, 它可以用激光脉冲的宽度  $\tau_p$  来表征,  $u_i(t)$  表征光场振幅和位相的统计涨落, 可以用相干时间  $\tau_c$  来描述. 若考虑如图 1 所示两入射光束为来自同一光源的脉冲激光, 两脉冲之间有一相对时间延迟  $\tau_d$ , 由这两光场感应的光栅的衍射效率已在文献[9]中作过详细讨论和计算最后得到形式为

$$\eta(\tau_d) \propto (2 \ln 2/\pi)^{1/2} (\tau_c/\tau_p) \exp(-2 \ln 2 \tau_d^2/\tau_p^2) + \exp(-\pi \tau_d^2/\tau_c^2) \quad (6)$$

由(6)式可以知道两相干光脉冲在非线性介质中引起的自衍射强度除由两脉冲激光相对延迟时间  $\tau_d$  决定外, 还与激光脉冲的宽度  $\tau_p$  和相干时间  $\tau_c$  有关. (6)式右边第一项表征激光脉冲时间特性; 第二次表征激光脉冲的相干特性, 对锁模激光器而言, 也即表示了激光的模式锁定程度. 由上述讨论可知, 只要选择一种三阶非线性系数较大, 且非线性响应时间较长的非线性介质, 则在实验上测定自衍射强度与相对延迟时间  $\tau_d$  的关系曲线, 通过对实验曲线进行适当的数值拟合, 可以求得脉冲宽度  $\tau_p$  和光源的相干时间  $\tau_c$ .

## 3 实验结果和讨论

图 2 为自衍射法测量超短激光脉冲宽度的实验装置图. 它包括被测量的超短脉冲激光器, 光延迟装置, 光学非线性介质和信号测量与处理系统. 被测量的是一套锁模 YAG 激光器, 它可以输出  $1.06 \mu\text{m}$  基波和  $0.532 \mu\text{m}$  二次谐波激光脉冲; 将安装有直角转向棱镜的迈克尔逊干涉仪作为光学延迟装置, 由步进马达推动干涉仪丝杠进行两光脉冲的时间延迟, 时间延迟精度可达 1 fs. 非线性光学介质膜片为掺有曙红的聚乙烯醇薄膜, 厚度为 0.2 mm. 曙红染料基态吸收波长在 532 nm 附近, 具有大的三阶非线性系数( $10^{-10}$  esu), 它的三重态寿命

在 ms 量级<sup>[10]</sup>, 所以激光感应光栅的寿命远大于激光脉冲宽度, 满足(6)式对非线性介质的要求. 衍射信号由光电倍增管接收, 经 Boxcar 作信号处理, 最后测得衍射信号与相对光延迟时间  $\tau_r$  的关系.

实验对两种锁模 YAG 激光器发出的超短激光脉冲宽度进行了测量, 一台为英国 JK 公司生产的 Nd:YAG 主动锁模激光器, 在测试前该激光器二次谐波的激光脉冲宽度已用日本滨松公司生产的 M1763 型条纹相机进行了测量, 测量结果如图 3(a) 所示, 激光脉冲波形为高斯型, 脉冲宽度  $\tau_p = 243$  ps. 图 3(b) 为曙红聚乙烯醇薄膜测得的自衍射强度与相对延迟时间  $\tau_r$  的关系. 图中黑点为实验结果, 实线为利用(6)式对实验结果进行数值拟合所得的拟合曲线. 由数值拟合

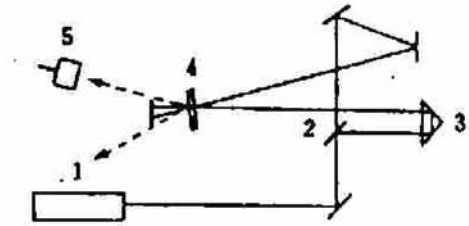


Fig. 2 The experimental set-up

1. mode-locked Nd:YAG laser, 2. Beam splitter (50% transmission), 3. delay line,
4. nonlinear medium, 5. photomultiplier

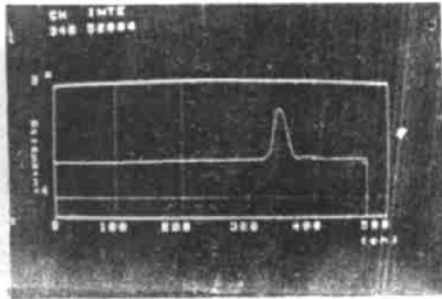


Fig. 3 (a) Temporal pulse shape taken from streak-camera (10 ps/channel)

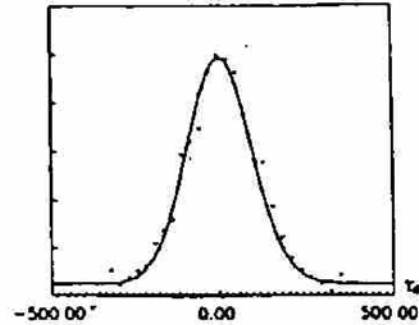


Fig. 3 (b) Self-diffraction signal intensities versus the delay time between two incident beams (for the first laser)

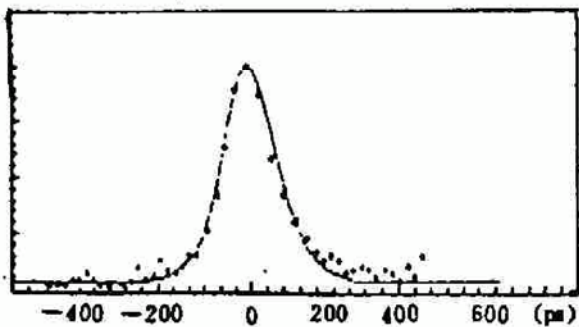


Fig. 4 Self-diffraction signal intensities versus the delay time between two incident beams (for the second laser)

得到的脉冲宽度为  $\tau_p = 241$  ps, 相干时间  $\tau_c = 238$  ps. 采用差方平均值方法对拟合曲线的拟合精度进行了估算, 实验点与拟合曲线的偏差小于 3%. 图 4 为利用自衍射法对另一自制主被动锁模 YAG 激光器的二次谐波脉冲测量的结果, 同样利用(6)式对实验点进行数值拟合, 结果为  $\tau_p = 161$  ps,  $\tau_c = 140$  ps. 同时利用双光子荧光法对该锁模激光器基波脉冲宽度进行了测量, 得到其脉宽  $\tau_p \approx 160$  ps. 应该指出, 作为倍频后的超短脉冲其宽度要小于基波的脉冲宽度, 但考虑到双光子荧光

法测量的误差源于底片感光度及测微光度计的分辨率等诸多因素的影响, 因此它的测量误差较大, 至使基波脉宽与二次谐波脉宽的差异未能显现出来.

上述实验结果表明, 采用激光感应光栅的自衍射法是测量超短脉冲宽度的较佳方法, 它不仅可测得激光脉冲的宽度, 还能给出被测超短激光脉冲的相干特性的信息, 它类似于测量超短激光脉冲宽度的二次谐波法. 但是它在实验上较二次谐波法容易得多. 许多有机染料介质具有较大的三阶非线性系数和长的非线性响应时间, 容易获得自衍射信号, 不像二次谐

波方法那样需要昂贵的非线性晶体. 在实验装置上不像二次谐波法那样需满足严格的位相匹配要求, 它对产生感应光栅的两束入射光的夹角亦无严格要求, 因此实验装置较简单. 由(6)式可知, 脉冲宽度测量精度主要决定于两光束的相对延迟时间  $\tau_d$ , 而在目前实验条件下, 满足 fs 量级的相对延迟时间是较容易的, 所以此种方法可以用于 fs 量级的超短激光脉冲的测量. 而用条纹相机等其它方法目前尚不可能测量如此短的激光脉冲.

**结 论** 本文提出并实验验证了可标志超短激光脉冲特征的一种简单技术——自衍射方法, 通过测量激光感应光栅对超短脉冲激光的衍射效率可从同时得到超短脉冲激光的脉冲宽度和相干特性的信息, 而且该方法实验装置简单, 测量波段较宽, 是值得推广的一种超短激光脉冲宽度的测量方法.

### 参 考 文 献

- [1] A. P. Schwarzenbach, T. S. Luk, I. A. McIntyre *et al.*, Subpicosecond KrF\* excimer-laser source. 1986, 11(8) : 499~501
- [2] R. R. Freeman, P. H. Bucksbaum, T. J. McIlrath, The ponderomotive potential of high intensity light and its role in the multiphoton ionization of atoms. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1988, 24(7) : 1461~1469
- [3] 张志三, 固体激光光谱学. 光谱学与光谱分析, 1991, 11(1) : 1~7
- [4] S. Szatmari, F. P. Schäfer, Simple generation of high-power, picosecond, tunable excimer laser pulses, *Opt. Commun.*, 1983, 48(4) : 279~283
- [5] N. Morita, T. Rajima, A nonlinear correlation method using multiphoton ionization for the measurement of UV ultrashort pulses. *Appl. Phys. (B)*, 1982, B28(1) : 25~29
- [6] T. C. Marshall, *Free Electron Laser*. New York, Macmillan, 1985 : 1~10
- [7] S. L. Shapiro, *Ultrashort Light Pulse, Picosecond Techniques and Applications*. Berlin, Spring-Verlag, 1982 : 23~36
- [8] 费浩生, 超快速过程测量的频域技术. 物理, 1990, 19(2) : 995~997
- [9] Rick Trebino, Erick Gustafson, A. E. Siegman, Fourth-order partial-coherence effects in the formation of integrated-intensity gratings with pulsed light sources. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, 3(10) : 1295~1304
- [10] 费浩生, 无机和有机材料中的非线性光学效应. 吉林大学自然科学学报(物理特刊), 1992, 310~321

## Duration Measurement of Ultrashort Laser Pulse Using the Technique of Transient Grating Induced by Laser

Yang Yanqiang      Fei Haosheng      Ai Xicheng      Han Li      Wei Zhenqian

(Physics Department, Jilin University, Changchun 130023)

(Received 18 January 1993; revised 5 July 1993)

**Abstract** In this paper, we describe the method of measuring the duration and the coherence time of ultrashort laser pulses using the technique of transient grating induced by laser. The two beams from the same laser interfere in the nonlinear medium and induce an integrated-intensity grating. Measuring the self-diffraction signal intensity versus the delay time between the two laser pulses and using the fourth-order coherence function, we can get the duration of the laser pulse and coherence time.

**Key words** ultrashort laser, self-diffraction, transient grating induced by laser.