

# 在空间-时间域测量飞秒脉冲\*

刘文军<sup>†</sup> 任守田 曲士良

(哈尔滨工业大学(威海)光电科学系, 威海 264209)

(2009 年 3 月 6 日收到;2009 年 7 月 28 日收到修改稿)

依据飞秒脉冲测量中的空间-时间耦合理论,通过采用空间分辨和光谱分辨在时间和空间域对飞秒脉冲强度和相位进行测量.测量装置主要由两个光学元件组成,实现了空间和光谱干涉.待测脉冲和参考脉冲通过一个绕中心轴转过某一角度的二维衍射光栅,产生倾斜的二维阵列全息图;一个带通滤波片对全息图进行分离,从而每个全息图含有一个唯一的频率.用照相机记录下所有的全息图,可以在时间和空间域再现出待测脉冲,并给出了测量结果.

**关键词:** 飞秒脉冲, 时间-空间耦合, 二维衍射光栅, 带通滤光片

**PACC:** 4280W, 4230K, 4280F

## 1. 引 言

由于飞秒激光脉冲的时间宽度极短而峰值强度极高,因而被广泛应用于物理、化学和生物学等领域探测和分辨超快过程<sup>[1-15]</sup>,如电子的跃迁、揭示和控制化学生物反应,在这些应用中需要知道或更好地提高分辨率,必须准确了解所用飞秒脉冲的各种特性,通过对比入射脉冲和出射脉冲的变化,可以更好地理解和研究物质的特性,因此对脉冲的测量就尤为重要.

测量飞秒激光脉冲的最初方法是强度自相关法<sup>[16]</sup>,但此方法存在如下不足:1)强度自相关图中同一个强度分布曲线可以对应于多个不同形状的脉冲,强度自相关法产生的是强度傅里叶变换的大小,无法反映出位相信息;2)用强度自相关法很难把不同的脉冲分辨开,包括脉冲的形状和相位,换句话说,由强度自相关法导出的脉冲形状具有一定的不确定性.在强度自相关的基础上又发展出频率分辨光学快门法(frequency-resolve optical gating)<sup>[17]</sup>,也是目前广泛使用的飞秒脉冲测量方法之一.频率分辨光学快门法具有以下优点:1)能够给出脉冲的强度、相位与时间或频率之间的关系;2)测量方法准确方便;3)装置简单;4)简单和复杂的脉冲都可以测量,从几个飞秒到皮秒,从中红外

到远紫外;5)可以进行单发和多发的测量,灵敏度可以测量从皮焦到微焦的脉冲.但是,频率分辨光学开关法是建立在简化的脉冲模型基础上,即把脉冲的时间特性和空间特性分离开,只对脉冲的时间特性进行测量,不考虑其空间特性.在实际中脉冲的空间特性和时间特性是相互依赖的,即使在自由空间传播的飞秒脉冲它的时间和空间特性之间也发生着相互的耦合作用;另外,由于飞秒脉冲的宽光谱特性,当它通过光学元件时不可避免地发生角色散现象,从而导致脉冲时间-空间耦合现象的发生.因此实现对脉冲的空间-时间特性的完全测量,将有助于对飞秒脉冲特性的认识,同时将使飞秒激光成为探索物理、化学、生物学、医学等领域的有利工具.本文分析了飞秒脉冲测量中的空间-时间耦合理论,并给出了一种测量方法的测量结果.

## 2. 时间-空间耦合理论

如果考虑时间和空间之间的耦合作用,飞秒脉冲模型除了包含时间参量之外,还应该包含空间参量,即脉冲电场的表达式由  $E(t)$  变为  $E(x, y, z, t)$ ,  $z$  为飞秒激光脉冲的传播方向,  $x$  和  $y$  为垂直于传播方向的横向截面.可以对脉冲电场的参量  $t$  进行傅里叶变换,把时间-空间模型变换为空间-频率模型,两者是等效的.发生时间-空间耦合的飞秒

\* 哈尔滨工业大学(威海)校科学研究基金(批准号:HIT(WH) 2008004)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: liuwenjun86@163.com

激光脉冲在空间传播时同样遵从菲涅尔-夫琅禾费公式

$$E(x, y, z, \omega) = \frac{i}{\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int E(x', y', z=0, \omega) \times \exp\left\{-\frac{i\pi}{\lambda z}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} dx' dy', \quad (1)$$

$E(x', y', z=0, \omega)$  为  $z=0$  处的脉冲电场. 由于测量的是飞秒脉冲的二维光谱图, 时间-空间耦合模型可以先只考虑  $x$  方向, 则(1)式可以简化为<sup>[18]</sup>

$$E(x, \omega, z) = \frac{i}{\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} E(x', z=0, \omega) \times \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda z}(x-x')^2\right] dx', \quad (2)$$

其中

$$E(x, \omega, z=0) = E_0 \exp\left(-\frac{\omega^2 \tau_0^2}{4}\right) \exp\left(-i \frac{\varphi_0^{(2)}}{2} \omega^2\right) \times \exp\left[-i \frac{k_0(x-\xi_0 \omega)^2}{2q_0}\right] \exp(-ik_0 \beta \omega x). \quad (3)$$

(3)式代入(2)式, 可以得到

$$E(x, \omega, z) = E_0 \left(\frac{ik_0}{2\pi z}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{2z}{k_0 w^2}\right)^{1/2} \times \exp\left(-\frac{\omega^2 \tau_0^2}{4}\right) \exp\left[-\frac{[x - (\xi_0 + \beta z)\omega]^2}{w^2}\right] \times \exp\left[-i \frac{(\varphi_0^{(2)} - k_0 \beta^2 z)\omega^2}{2}\right] \exp(-ik_0 \beta \omega x) = E(\omega) \exp\left[-\frac{(x - \xi \omega)^2}{w^2}\right] \exp(-ik_0 \beta \omega x), \quad (4)$$

其中

$$\xi = \xi_0 + \beta z, \quad (5)$$

$$E(\omega) = E_0 \left(\frac{ik_0}{2\pi z}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{2z}{k_0 w^2}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\omega^2 \tau_0^2}{4}\right) \times \exp\left[-i \frac{(\varphi_0^{(2)} - k_0 \beta^2 z)\omega^2}{2}\right], \quad (6)$$

$\tau_0$  是脉冲的时间宽度,  $k_0$  是波数;  $\varphi_0^{(2)}$  为脉冲在  $z=0$  处的群速度色散参量;  $\xi_0 = (dx_0/d\omega)$  是空间啁啾在  $x$  方向的分量,  $(x_0, y_0)$  是角频率分量  $\omega$  的中心位置;  $\beta = (d\theta/d\omega)$  是角色散参量,  $\theta$  是方向角;  $q_0 = [d + (ik_0 w^2/2)]$ ,  $d$  是光腰的位置,  $w$  是光腰的半径. 对

于时间-空间耦合模型的脉冲沿  $y$  方向的分布可以依照上述原理作同样的分析. 沿传播方向的某一确定位置  $z=z_0$  处,  $E(x, y, t)$  是  $E(x', y', \omega)$  的傅里叶变换

$$E(x, y, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, \omega) \exp(i\omega t) d\omega \approx \frac{1}{2\pi} \sum_k E(x, y, \omega_k) \exp(i\omega_k t) \delta\omega. \quad (7)$$

### 3. 实验及讨论

要实现对电场的三维测量, 须采用空间和时间分辨的强度和位相测量装置<sup>[19]</sup>. 实验装置结构示意图如图 1 所示, 测量装置从光谱分辨和空间分辨两个方面对脉冲进行测量, 可以给出脉冲空间和时间方面的信息. 谐振腔输出的 60 fs 入射脉冲被分光镜  $BS_1$  一分为二, 其中一部分经过反射镜  $M_1, M_2, M_3$  反射后作为参考光; 另一部分经过反射镜  $M_4, M_5, M_6$  反射后入射到石英玻璃棒后出射脉冲作为信号光. 夹角为  $\alpha$  的参考光和信号光经过分光镜  $BS_2$  后入射到二维衍射光栅  $D$ , 衍射光栅绕光轴转过一个小的角度, 经过光栅衍射后形成一个倾斜的在空间域和时间域交叉和重叠的二维阵列全息图; 带通滤波器  $F$  对全息阵列进行光谱滤波. 由于带通滤波器有一个小的倾斜角度, 从而使每个全息图含有一个唯一的光谱频率, 这样在空间不同位置上的全息图与不同波长有关, 实现对脉冲中的每一频率成分产生全息图, 每一个全息图对应于特定的波长电场  $E(x, y, \omega)$ . 产生的阵列全息图由 CCD 照相机记录, 通过调节延迟臂的光程可以使全息图的对比度达到最大, 记录的全息图阵列如图 2 所示.

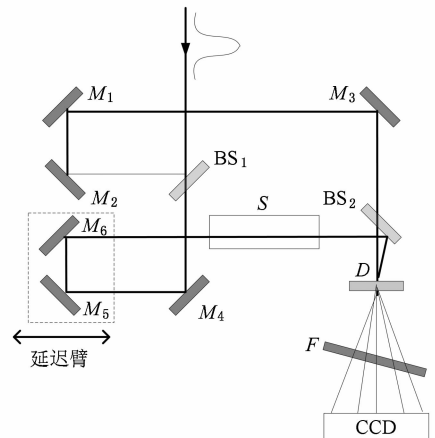


图 1 实验装置示意图

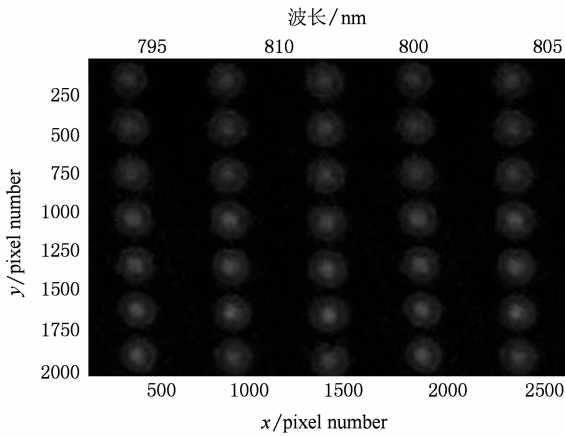


图2 CCD记录的阵列全息图

采用重构迭代算法对阵列全息图进行二维傅里叶变换和逆变换,可以重建出待测脉冲的电场在空间和时间的分布. 出射脉冲的宽度为 72fs, 图 3 (a) 为再现出的在  $y=0$  时的脉冲  $x-t$  坐标和强度分布, (b) 为再现出的在  $x=0$  时的脉冲  $y-t$  坐标和强度分布, 图中的高度为脉冲的归一化强度. 图中的

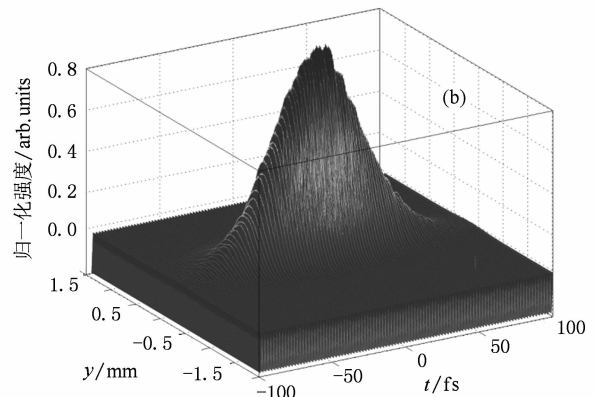
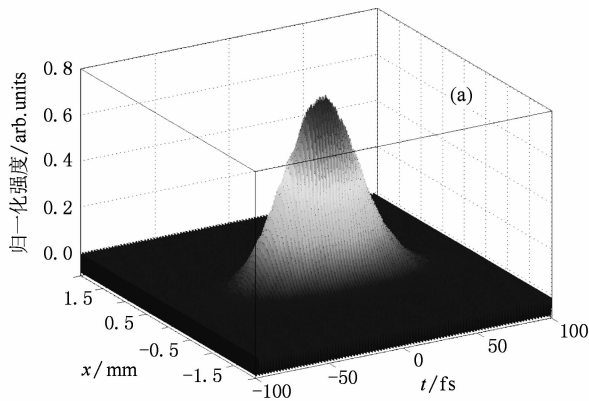


图3 实验结果 (a) 脉冲的强度和位相与空间坐标  $x$  和时间  $t$  之间的分布图像; (b) 脉冲的强度和位相与空间坐标  $y$  和时间  $t$  之间的分布图像

不适合于测量超宽光谱宽度为几个飞秒的脉冲.

## 4. 结 论

分析了飞秒脉冲测量中的时间-空间耦合效应. 以菲涅尔-夫琅禾费公式为出发点推导出了考虑时间-空间耦合效应的飞秒脉冲电场表达式. 基于时

亮暗表示脉冲的瞬时频率, 即脉冲位相的导数; 瞬时频率对应于时间啁啾, 空间梯度对应于空间啁啾.

这种采用空间与时间分辨的强度和位相测量装置中的核心元件是二维衍射光栅和带通滤波器. 为了避免不同衍射级次之间的重叠, 要求光栅的位置  $z > (bw/\lambda_0)$ , 其中  $b$  为光栅条纹之间的间距,  $w$  为入射光的光束宽度,  $\lambda_0$  为中心波长; 同时为了避免自衍射效应, 要求  $z \ll (w^2/\lambda_0)$ ; 因此光栅的工作距离应为  $(bw/\lambda_0) \ll z \ll (w^2/\lambda_0)$ . 由于二维光栅的衍射效率与  $(b/a)^2$  有关 ( $a$  为光栅狭缝的宽度), 二者的比例过大可以导致更多衍射级次的出现, 但会降低衍射效率, 因此需要权衡好二者的比例关系, 实验中采用的光栅周期为 60  $\mu\text{m}$ . 经过衍射光栅后, 不同的衍射级次有不同的中心位置和衍射角度, 因此带通滤波器必须能够使每一级次的某一确定波长通过, 透射波长依赖于不同的位置或角度. 这种测量方法结构简单, 属于单发测量, 而且不需要使用非线性光学晶体; 但是由于衍射光栅对各个衍射级次引入角色散和空间啁啾, 因此这种测量方案并

间-空间耦合的脉冲模型, 除了包含脉冲的时间分布外, 还需要考虑脉冲的空间分布特性. 采用光谱分辨和空间分辨测量装置, 实现了对飞秒脉冲空间及时间特性的测量.

感谢中科院上海光机所信息光学实验室郑伟在实验方面的前期工作, 感谢周常河研究员在实验方面给予的支持.

- [1] Feurer T, Vaughan J C, Nelson K A 2003 *Science* **299** 374  
 [2] Tian P, Keusters D, Suzuki Y, Warren W S 2003 *Science* **300** 1553

- [3] Li B, Zhao J, Onda K, Jordan K D, Yang J, Petek H 2006 *Science* **311** 1436  
 [4] Sandhu A S, Gagnon E, Santra R, Sharma V, Li W, Ho P,

- Ranitovic P, Cocke C L, Murnane M M, Kapteyn H C 2008 *Science* **322** 1081
- [5] Takeuchi S, Ruhman S, Tsuneda T, Chiba M, Taketsugu T, Tahara T 2008 *Science* **322** 1073
- [6] Cao S Y, Zhang Z G, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2971 (in Chinese) [曹士英、张志刚、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 2971]
- [7] Liu W J, Cao W, Guo J X, Liu H L, Qu S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2192 (in Chinese) [刘文军、曹武刚、郭金鑫、刘海磊、曲士良 2008 物理学报 **57** 2192]
- [8] Zhao H, Zhao Y Y, Tian J R, Wang P, Zhu J F, Ling W J, Wei Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 892 (in Chinese) [赵环、赵研英、田金荣、王鹏、朱江峰、令维军、魏志义 2008 物理学报 **57** 892]
- [9] Sun H Q, Zhao G Z, Zhang C L, Yang G Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 790 (in Chinese) [孙红起、赵国忠、张存林、杨国桢 2008 物理学报 **57** 790]
- [10] Zhu J F, Du Q, Wang X L, Teng H, Han H N, Wei Z Y, Hou X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7753 (in Chinese) [朱江峰、杜强、王向林、滕浩、韩海年、魏志义、侯洵 2008 物理学报 **57** 7753]
- [11] Zhao H M, Wang L X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1332 (in Chinese) [赵红敏、王鹿霞 2009 物理学报 **58** 1332]
- [12] Bowlan P, Gabolde P, Shreenath A, McGresham K, Trebino R, Akturk S 2006 *Opt. Express* **14** 11892
- [13] Bowlan P, Gabolde P, Coughlan M A, Trebino R, Levis R J 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** A81
- [14] Fuchs U, Zeitner U D, Tuennermann A 2005 *Opt. Express* **13** 3852
- [15] Bowlan P, Gabolde P, Trebino R 2007 *Opt. Express* **15** 10219
- [16] Sala K L, Kenney-Wallace G A, Hall G E 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 990
- [17] Trebino R 2002 *Frequency-resolved Optical Gating: The measurement of Ultrashort Laser Pulse* (Boston: Kluwer Academic Publishers)
- [18] Akturk S, Gu X, Zeek E, Trebino R 2004 *Opt. Express* **12** 4399
- [19] Gabolde P, Trebino R 2006 *Opt. Express* **14** 11460

## Measuring femtosecond pulse in space-time domain \*

Liu Wen-Jun<sup>†</sup> Ren Shou-Tian Qu Shi-Liang

(Department of Opto-Electronics Science, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

(Received 6 March 2009; revised manuscript received 28 July 2009)

### Abstract

We analyze theory of the spatiotemporal coupling in the electric field of a femtosecond pulse. The complete spatiotemporal characterization of femtosecond pulse is realized by use of spatially and spectrally resolved intensity and phase evaluation device. The apparatus combines the spatially and spectrally resolved interferometry. The unknown and reference pulses pass through a 2D diffraction grating, generating a tilted 2D array of holograms. A tilted bandpass filter separates the beam pairs so that each hologram contains a single, unique frequency. A single camera frame records all of the holograms, from which the complete spatiotemporal field of the unknown pulse can be reconstructed.

**Keywords:** femtosecond pulse, spatiotemporal coupling, 2D diffraction grating, bandpass filter

**PACC:** 4280W, 4230K, 4280F

\* Project supported by the Scientific Research Foundation of Harbin Institute of Technology at Weihai (Grant No. HIT(WH) 2008004).

<sup>†</sup> E-mail: liuwenjun86@163.com