

基于自衍射效应的自参考光谱干涉方法的研究*

李方家 刘军[†] 李儒新

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 强场激光国家重点实验室, 上海 201800)

(2012年8月16日收到; 2012年9月28日收到修改稿)

研究一种基于非线性透明光学介质中的自衍射和自参考光谱干涉的新方法来进行飞秒激光脉冲测量. 实验中, 基于此新方法设计一种简单装置, 对 800 nm 中心波长, 约 40 fs 近无啁啾飞秒激光脉冲进行测量, 并与自参考光谱相干电场重建法测量结果进行比较, 得到了一致的结果. 此新方法与相应的装置结构简单, 可以对深紫外到中红外光谱范围的飞秒脉冲进行测量.

关键词: 飞秒激光脉冲, 自参考光谱干涉, 自衍射, 脉冲测量

PACS: 42.60.Da, 06.60.Jn, 42.65.Es

DOI: 10.7498/aps.62.064211

1 引言

最近几年, 随着飞秒激光技术的发展, 飞秒脉冲在科研、加工、生物、医疗、国防、通信等各个领域得到了越来越广泛的应用. 因此, 飞秒激光脉冲宽度作为一个重要的光学参量, 在很多实验中对它的测量就十分必要了. 伴随着激光技术的发展, 飞秒激光脉冲测量技术也在不断发展^[1]. 自相关法作为一种常用的脉宽测量方法, 其原理以及结构简单, 却不能提供飞秒脉冲的相位信息^[2]. 在目前众多的测量方法中, 能给出脉冲相位信息的两个典型测量方法有频率分辨光学开关法^[3-5] (frequency-resolved optical gating, FROG) 和自参考光谱相干电场重建法 (self-referencing spectral phase interferometry for direct electric reconstruction, SPIDER)^[6-8]. 通常 FROG 测量方法需要比较长的时间, 因为它需要进行多次迭代才能找到测量图形近似的解, 同时迭代结果和图形比较的方法必然残存误差. 在 SPIDER 方法中, 通常需要非线性光学晶体来转换产生测量信号. 由于非线性光学晶体的相位匹配条件, 这使得每台测量仪器只能适应于特定的光谱范围, 从而限制了该方法在宽频谱范

围内的应用. 此外, 十年前人们就已经提出了利用光谱干涉来测量飞秒脉冲的光谱强度和相位的方法^[9-11]. 利用此方法可以对脉冲进行线性、灵敏、准确的测量. 但是, 这种方法需要一束与待测脉冲相关的参考激光脉冲, 同时此参考脉冲需要拥有比待测脉冲更宽的光谱和已知的光谱相位. 通常情况下, 满足这种条件的参考脉冲很难获得. 是否可以直接从待测的飞秒脉冲获得一个满足以上条件的并与待测脉冲相关的参考脉冲呢? 基于这种想法, 自参考光谱干涉 (self-reference spectral interferometry, SRSI) 作为一个新的方法得到了发展. 2010 年, 有人提出了利用交叉偏振波 (cross-polarized wave, XPW) 作为参考光的自参考光谱干涉方法用来测量脉冲^[12-14]. 这种方法简单方便, 只需要 3 次迭代计算就能给出激光脉冲的光谱强度和相位. 然而, 基于 XPW 的 SRSI 测量方法需要光学偏振元件. 由于偏振光学元件只对特定激光波长有效, 并且有一定的光谱带宽限制, 这样也就使得这一方法和仪器只能在特定光谱范围内应用. 同时偏振光学元件引入的色散也限制其难以精确测量 10 fs 以下的超短激光脉冲. 最近, 自衍射 (self-diffraction, SD) 效应^[15] 过程中的一阶自衍射光被用作参考光来进行 SRSI 测量激光脉冲^[16]. 与 XPW-SRSI 相比, 由

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178006, 11274327)、上海市浦江人才计划 (批准号: 12PJ1409300) 和国家青年千人计划资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: jliu@siom.ac.cn

于 SD-SRSI 中不需要光学偏振元件, 因此其对待测光的光谱范围及脉冲宽度具有较小的限制. 在以前原理性验证的实验中, 测量光路结构复杂, 并且参考光和待测光需要精确调节来使其在空间上重合共线.

本文对 SD-SRSI 方法中的光路进行了进一步的优化, 并将测量装置进行了简化, 整个测量装置仅用几个光学元件, 大大简化了光路结构, 提高系统稳定性. 利用此测量装置, 我们测量了 Ti: Sapphire 再生放大飞秒激光器输出的激光脉冲形状, 得到的结果与商用 SPIDER (APE 公司, SPIDER) 测得的结果一致.

2 实验装置

实验中待测的飞秒激光脉冲是由商用 Ti: Sapphire 再生放大飞秒激光系统 (Spectra Physics 公司, Spitfire) 产生, 激光器输出飞秒激光脉冲的单脉冲能量约为 0.7 mJ, 脉冲宽度约为 40 fs, 中心波长为 800 nm, 重复频率为 1 kHz, 光斑直径约 10 mm. 我们利用小孔选出中心区域口径约 4 mm 的激光, 此光束经过一个凸型柱面镜和一个凹形柱面镜所组

成的望远镜系统在垂直面上进行扩束, 然后经过如图 1 所示的一个在垂直方向上依次有三个相同大小 (约 1 mm 口径) 小孔的挡板. 经过此挡板的激光在垂直方向上被分成三束. 其中, 最下面的一束为待测激光, 在此束光路上加一厚度约为 660 μm 的可调中性衰减片来引入时间延时并对待测光进行强度衰减. 在测量过程中, 通常调节衰减片使待测激光强度要比参考光弱, 来保证干涉光谱的调制精确与区分参考光与待测光. 接着, 这三束平行激光被一个焦距为 300 mm 的凹面反射镜聚焦到一点, 在焦点位置被放上一片厚度为 500 μm 的熔石英玻璃片. 上面的两束未经过衰减片的激光束由于时间和空间上自动重合, 因此在熔石英玻璃片上会出现 SD 效应, 并在光束两端出现一阶 SD 信号光. 利用聚焦光束与光轴的夹角随入射光束距凹面反射镜中心光轴的距离的改变而变化, 在制作挡板小孔位置的过程中, 我们确保第三束待测光透过熔石英玻璃片后与其中一侧的一阶 SD 信号自动地共线重合. 最后, 通过两个小孔滤掉杂散光并将空间共线重合的一阶 SD 信号和待测光入射到高精度光谱仪 (Ocean Optics 公司, HR4000), 得到光谱干涉信号.

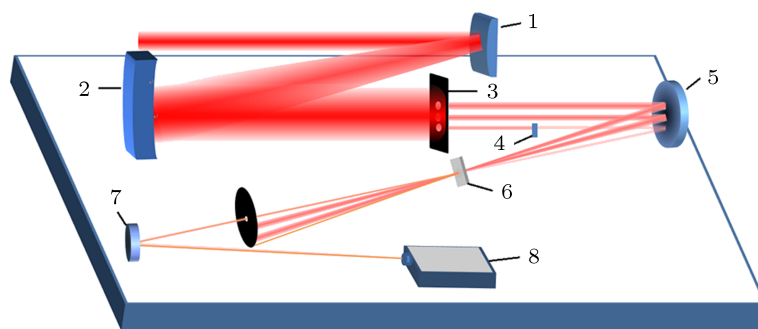


图 1 实验装置光路 1 是凸型柱面镜, 焦距 50 mm; 2 是凹型柱面镜, 焦距 200 mm; 3 是垂直方向上带有三个小孔的挡板; 4 是可调中性衰减片, 厚度为 660 μm ; 5 是凹面反射镜, 焦距 300 mm; 6 是熔石英玻璃片, 厚度为 500 μm ; 7 是凹面反射镜, 焦距为 200 mm; 8 为光谱仪

3 实验原理

在实验过程中, 需要把空间上精确地重合在一条直线的参考光和待测光入射到高精度的光谱仪来获得干涉光谱. 作为参考光需要满足两个条件: 一是参考光的光谱要比待测光的光谱宽; 二是参考光的光谱相位已知, 或是能由待测光的光谱相位演算出来. 而自衍射效应作为一个三阶非线性过程, 在入射激光脉冲无啁啾时候可以增宽并平滑入射

激光的光谱. 当参考光和待测光共线并空间重合地进入光谱仪, 就可以获得最大调制深度的光谱干涉条纹 $D(\omega, \tau)$:

$$\begin{aligned} D(\omega, \tau) &= \left| E_{\text{ref}}(\omega) + E(\omega) e^{i\omega\tau} \right|^2 \\ &= |E_{\text{ref}}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2 + f(\omega) e^{i\omega\tau} \\ &\quad + f^*(\omega) e^{-i\omega\tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中: ω 为激光角频率, $S_0(\omega) = |E_{\text{ref}}(\omega)|^2 + |E(\omega)|^2$ 是待测光和参考光的光谱之和; $f(\omega) = E_{\text{ref}}(\omega)^* E(\omega)$ 是两束光的光谱干涉项.

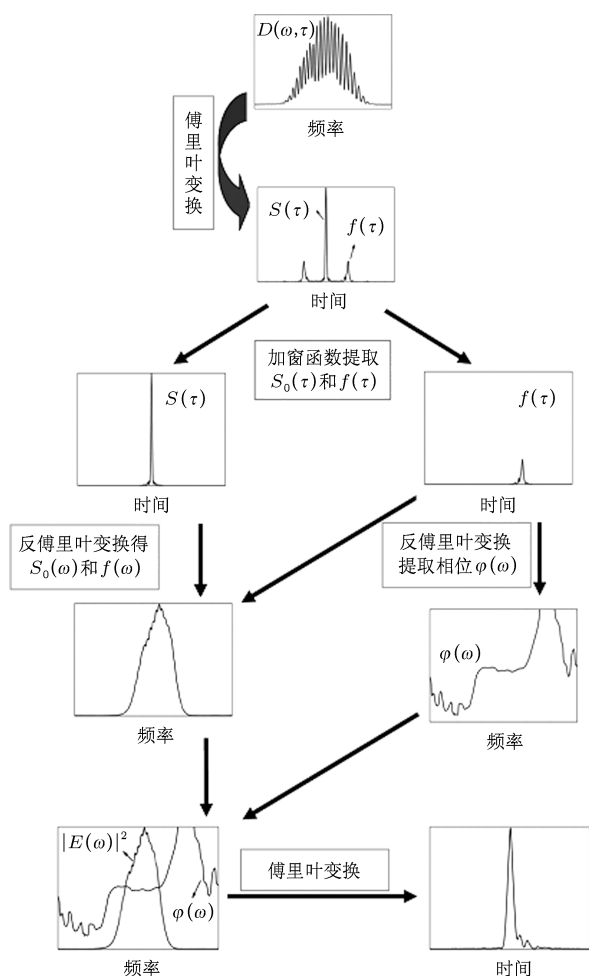


图2 利用 SRSI 计算激光光谱、光谱相位及脉冲形状的流程圖

为了获得待测激光的光谱和光谱相位, 我们按图 2 所示的步骤来计算. 首先, 将测得的干涉光谱信号 $D(\omega, \tau)$ 利用傅里叶变换到时域; 接着利用已得到的时域信号, 采用合适的窗函数 (如超高斯函数) 将 $S_0(\tau)$ 和 $f(\tau)$ 分别提取出来, 利用已得到 $S_0(\tau)$ 和 $f(\tau)$ 进行反傅里叶变换到 $S_0(\omega)$ 和 $f(\omega)$, 进而可以通过下面的公式将待测激光的光谱振幅 $|E(\omega)|$ 和参考光的光谱振幅 $|E_{\text{ref}}(\omega)|$ 直接表示出来^[10]:

$$|E(\omega)| = \frac{1}{2} \left[\sqrt{S_0(\omega) + 2|f(\omega)|} - \sqrt{S_0(\omega) - 2|f(\omega)|} \right], \quad (2)$$

$$|E_{\text{ref}}(\omega)| = \frac{1}{2} \left[\sqrt{S_0(\omega) + 2|f(\omega)|} + \sqrt{S_0(\omega) - 2|f(\omega)|} \right], \quad (3)$$

从而可以初步得到待测激光的光谱 $|E(\omega)|^2$ 和参考光的光谱 $|E_{\text{ref}}(\omega)|^2$.

而对于待测激光的初步光谱相位, 则通过对 $f(\omega)$ 的解相运算 $\arg f(\omega)$, 利用 (4) 式迭代计算出来:

$$\phi(\omega) = \phi_{\text{ref}}(\omega) + \arg f(\omega) + C, \quad (4)$$

其中, $\phi(\omega)$ 和 $\phi_{\text{ref}}(\omega)$ 分别是待测激光和参考光的光谱相位 (初始假设为 0). C 是衰减片的色散引入的光谱相位常数, 可以直接计算得到.

将初步得到的激光光谱和光谱相位进行傅里叶变换, 即可得到待测激光脉冲的脉冲形状 $|E(t)|^2$ 和脉冲宽度, $E(t)$ 为 $E(\omega)$ 的傅里叶变换的值. 由于参考光相位并不一定绝对等于 0, 因此需要通过迭代的方法优化激光光谱和光谱相位. 由自衍射的性质可知 $E_{\text{ref}}(t) \propto E(t)|E(t)|^2$, 对它进行反傅里叶变换即可得到参考光的光谱 $|E_{\text{ref}}(\omega)|^2$ 和光谱相位 $\phi_{\text{ref}}(\omega)$, 将得到的光谱相位代入 (4) 式, 即可得到新的待测激光光谱相位, 通过对待测激光光谱相位进行傅里叶变换, 即得到待测激光脉冲的脉冲形状 $|E(t)|^2$ 和脉冲宽度. 重复以上迭代步骤, 即得到校准的待测激光光谱与光谱相位, 进而得到校准的激光脉冲形状和脉冲宽度.

4 实验结果及分析

实验中将利用 SD-SRSI 所测的结果与 SPIDER 测量的结果进行比较, 如图 (3) 所示. 图 3(a) 中的细线表示测得的干涉光谱, 黑色粗线表示一阶 SD 信号光谱, 虚线表示待测激光光谱. 由图可见, 获得的一阶 SD 信号光谱相对于待测的激光光谱, 光谱平滑并且具有更宽的光谱宽度. 实验中, 一阶 SD 信号强度比待测激光光谱强度要强, 这样在计算中容易分离两个激光脉冲, 并且让待测光谱都包括在干涉光谱中, 从而减少误差. 图 3(b) 为利用 SD-SRSI 计算得到的激光光谱 (黑色实线以及光谱相位 (虚线)). 图 3(c) 为 SPIDER 所测得的激光光谱 (黑色实线) 与其光谱相位 (虚线). 图 3(d) 中的细线表示由 SD-SRSI 所得的脉冲形状, 黑色粗线表示由 SPIDER 所得的脉冲形状, SPIDER 所测得光谱相位有一斜度造成脉冲在时域的平移, 虚线是将 SPIDER 所测的脉冲形状平移以方便与 SD-SRSI 所得结果的比较. 由图可见两种方法测得的激光脉冲形状几乎重合, 脉冲宽度约为 38 fs. 通过比较文中的 SD-SRSI 装置和商用 SPIDER 所测得的光谱、光

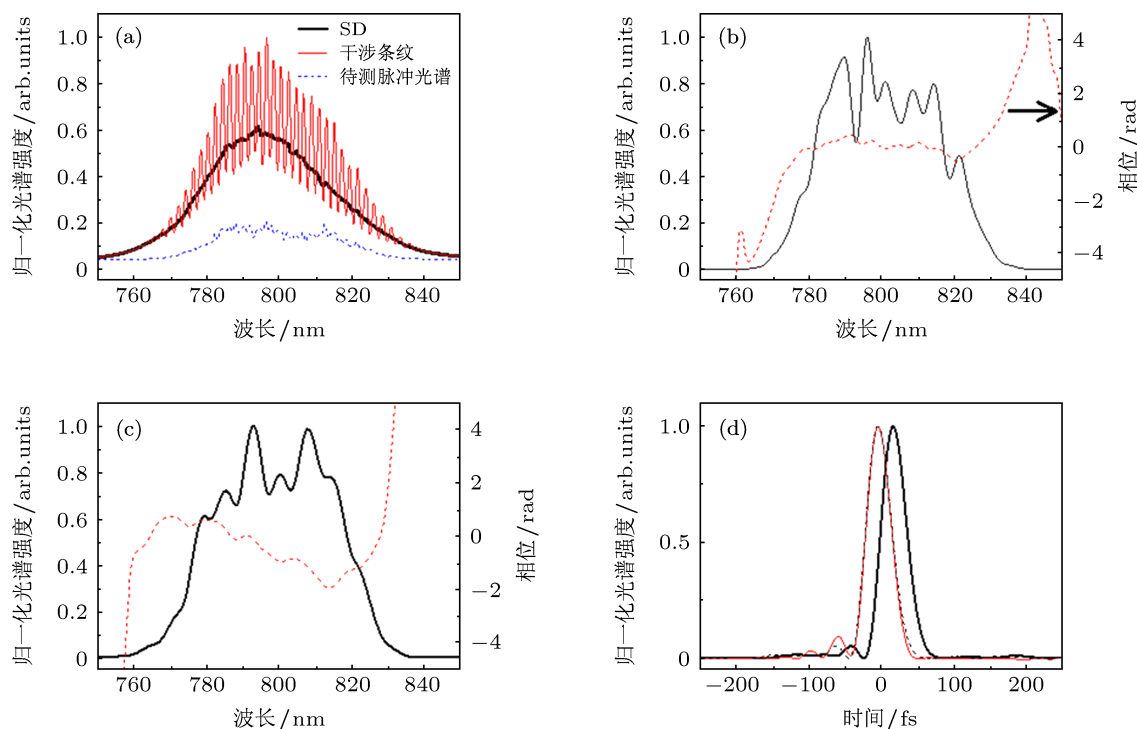


图3 实验结果 (a) 光谱仪所测到光谱干涉条纹, 待测脉冲光谱和 SD 光谱; (b) 利用 SD-SRSI 计算得到的激光光谱以及光谱相位; (c) SPIDER 所测得的激光光谱与光谱相位; (d) 所测的激光脉冲形状; 细线表示由 SD-SRSI 所得的脉冲形状, 黑色粗线表示由 SPIDER 所得的脉冲形状, 虚线为 SPIDER 所得脉冲的平移图

谱相位及脉冲形状, 可以得到 SD-SRSI 能准确地测量出超短脉冲信号的脉宽、光谱相位及脉冲形状等信息. 值得注意的是本方法适用于入射激光没有空间啁啾的情况. 当入射激光有严重的空间啁啾时候, 会影响本方法的测量. 相关的影响需要后续更加详细的研究.

5 结论

利用简单的光路完成 SD-SRSI 方法的测量飞

秒激光脉冲装置与实验. 通过利用此装置对 800 nm 中心波长, 约 40 fs 脉冲宽度的近无啁啾飞秒激光脉冲的测量, 并与商用 SPIDER 测量仪进行比较, 证实我们的 SD-SRSI 装置可以测得与 SPIDER 相一致的结果. 这种装置结构简单, 可以用来进行飞秒激光脉冲形状的实时监测和单发测量, 并且可以拓展到深紫外和红外等更宽的光学波段, 因此将在飞秒超快激光领域具有重要应用.

- [1] Walmsley I A, Dorrer C 2009 *Adv. Opt. Photon.* **1** 308
- [2] Trebino R 2000 *Frequency-Resolved Optical Grating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses* (Kluwer Academic Publishers)
- [3] Trebino R, DeLong K, Fittinghoff D, Sweetser J, Krumbuegel M A, Richman B A, Kane D J 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 3277
- [4] Trebino R, Bowlan P, Gabolde P, Gu X, Akturk S, Kimmel M 2009 *Laser Photon. Rev.* **3** 314
- [5] Wang Z H, Wei Z Y, Teng H, Wang P, Zhang J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 363 (in Chinese) [王兆华, 魏志义, 滕浩, 王鹏, 张杰 2003 物理学报 **52** 363]
- [6] Iaconis C, Walmsley I A 1998 *Opt. Lett.* **23** 792
- [7] Baum P, Riedle E 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 1875
- [8] Lepetit L, Chériaux G, Joffre M 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 2467
- [9] Wang P, Zhao H, Zhao Y Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 228 (in Chinese) [王鹏, 赵环, 赵研英 2007 物理学报 **56** 228]
- [10] Dorrer C, Joffre M 2001 *C. R. Acad. Sci. IV Phys. Astrophys.* **2** 1415
- [11] Dorrer C, Kang I 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** A1
- [12] Jullien A, Canova L, Albert O, Boschetto D, Antonucci L, Cha Y H, Rousseau J P, Chaudet P, Cheriaux G, Etchepare J, Kourtev S, Minkovski N, Saltiel S M 2007 *Appl. Phys. B* **87** 595
- [13] Oksenhendler T, Coudreau S, Forget N, Crozatier V, Grabielle S, Herzog R, Gobert O, Kaplan D 2010 *Appl. Phys. B* **99** 7
- [14] Trisorio A, Grabielle S, Divall M, Forget N, Hauri C P 2012 *Opt. Lett.* **37** 2892
- [15] Liu J, Okamura K, Kida Y, Kobayashi T 2010 *Opt. Express* **18** 22245
- [16] Liu J, Jiang Y, Kobayashi T, Li R, Xu Z 2012 *JOSA B* **29** 29

Self-diffraction based self-reference spectral interferometry*

Li Fang-Jia Liu Jun[†] Li Ru-Xin

(State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 16 August 2012; revised manuscript received 28 September 2012)

Abstract

A new method of characterizing the femtosecond pulse is proposed based on the self-diffraction process in a thin transparent bulk medium and the self-reference spectral interferometry. A simple device is designed based on this technique and is successful in characterizing a ~ 40 fs pulse at 800 nm central wavelength. The result is in accordance with that measured by a commercial self-reference spectral phase interferometry for direct electric reconstruction. Pulses in a spectral range from deep UV to middle IR are expected to be measured by this new method and corresponding simple device.

Keywords: femtosecond laser pulses, self-reference spectral interferometry, self-diffraction, pulse measurement

PACS: 42.60.Da, 06.60.Jn, 42.65.Es

DOI: 10.7498/aps.62.064211

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178006, 11274327), the Shanghai Pujiang Program of China (Grant No. 12PJ1409300) and the Recruitment Program of Global Experts of China.

[†] Corresponding author. E-mail: jliu@siom.ac.cn