

文章编号: 1001-3806(2008)02-0194-04

超短光脉冲的频率分辨光学开关法测量研究

张建忠

(太原理工大学 理学院 物理系, 太原 030024)

摘要: 为了对二次谐波型和偏振开关型频率分辨光学开关法测量超短光脉冲的研究, 利用矩阵的方法对实验系统中几种常见超短光脉冲的二次谐波-频率分辨光学开关和偏振开关-频率分辨光学开关光谱图进行了数值模拟, 并采用基于矩阵的主元素广义投影算法从数值模拟的二次谐波-频率分辨光学开关光谱图中恢复了脉冲的振幅和相位, 误差达到收敛的标准 ($G < 10^{-4}$)。结果表明, 频率分辨光学开关能够精确地测量超短光脉冲。

关键词: 超快光学; 脉冲测量; 二维相位恢复; 频率分辨光学开关法

中图分类号: O437.1 **文献标识码:** A

Measurement of ultrashort laser pulses using frequency-resolved optical gating

ZHANG Jian-zhong

(Department of Physics, College of Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract For the sake of studying second-harmonic generation (SHG) and polarization gating (PG) frequency-resolved optical gating (FROG), both techniques measuring the intensity and phase of ultrashort laser pulses, SHG-FROG and PG-FROG traces of several types of common ultrashort pulses were numerically simulated using a matrix approach. Taking SHG-FROG as an example, the amplitude and the phase of these pulses were gleaned from these SHG-FROG traces by the principal component generalized projections algorithm and the SHG-FROG error was less than 10^{-4} . The results show that FROG can accurately measure ultrashort laser pulses.

Key words ultrafast optics; measurement of pulses; two-dimensional phase retrieval; frequency-resolved optical gating

引 言

自 20 世纪 90 年代以来, 超短光脉冲产生技术取得了巨大的进展。超短光脉冲在物理学、化学、生物学以及工业领域得到了广泛的应用^[1]。精确测量超短光脉冲已变得极其重要。但是传统的测量脉冲技术无法全面准确地获得超短光脉冲的振幅和相位信息。近几年, 许多新型测量超短光脉冲的技术已被提出, 如频率域相位测量^[2]、频域和时域分辨转换技术^[3], 然而基于时频技术的频率分辨光学开关 (frequency resolved optical gating FROG) 法能够准确地测量各种波长和能量脉冲的振幅和相位^[4,5], 已成为测量超短光脉冲实用的方法之一。

FROG 是由实验和算法两部分组成, 实验部分是将待测脉冲经分束器后形成两个具有相对时间延迟的脉冲在非线形介质中混合, 相互作用后产生一个关于时间和延迟的信号脉冲, 用光谱仪和 CCD 将其记录为

强度随频率和时间延迟变化的空间图形, 即 FROG 光谱图^[6]。

两脉冲的相互作用可以基于各种瞬时响应的非线性光学过程, 其中基于二阶非线性效应的产生二次谐波频率分辨光学开关 (second-harmonic generation FROG, SHG-FROG)^[7], 基于三阶非线性效应的产生偏振频率分辨光学开关 (polarization gating FROG, PG-FROG)^[8,9]。这两种频率分辨光学开关法较为常用, 能够得到超短脉冲的振幅和相位信息。对于脉冲能量比较弱 (纳焦量级) 的脉冲, 使用 SHG-FROG 进行测量, 对于脉冲能量更强的脉冲, 可以使用 PG-FROG。

FROG 的算法部分是利用二维相位恢复算法, 从 FROG 光谱图中提取脉冲的振幅和相位分布。二维相位恢复算法是通过傅里叶变换和傅里叶反变换交替迭代计算, 并结合频域限制和时域限制, 使起始猜测信号在迭代中逐渐接近待测信号, 最终获得待测信号^[9]。在 FROG 中, 典型的二维相位恢复算法有广义投影算法^[10]和广义主元素投影算法 (principal component generalized projects algorithm, PCGPA)^[11]。PCGPA 基于矩阵运算, 相比较具有稳定和快速的特点, 对超短脉冲实时测量更为精确。

作者简介: 张建忠 (1979-), 男, 讲师, 现主要从事超短光脉冲测量方面的研究。

Email: zha Jianzhong@163.com

收稿日期: 2007-02-02 收到修改稿日期: 2007-03-09

1 FROG 实验装置及 FROG 光谱图数值模拟

1.1 SHG-FROG

图 1 为 SHG-FROG 实验装置图。将待测脉冲分

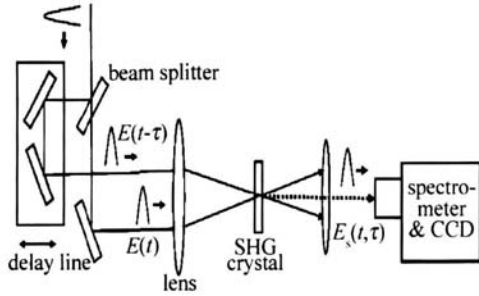


Fig 1 Schematic of SHG-FROG device

成两束, 让一束通过延迟线, 作为开关脉冲, 另一束经过全反镜反射后与开关脉冲平行, 作为探测脉冲, 然后用聚焦透镜将这两束光聚焦到倍频晶体中, 由于非线性作用在倍频晶体后出现信号光, 利用光谱仪和 CCD 记录下 SHG-FROG 光谱图, 其数学表达式为:

$$I_{\text{SHG-FROG}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E(t)E(t-\tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2 \quad (1)$$

式中, τ 为两束光之间的相对延迟, ω 为关于时间 t 作傅里叶变换的频率。

1.2 PG-FROG

图 2 为 PG-FROG 实验装置图。待测脉冲被分成

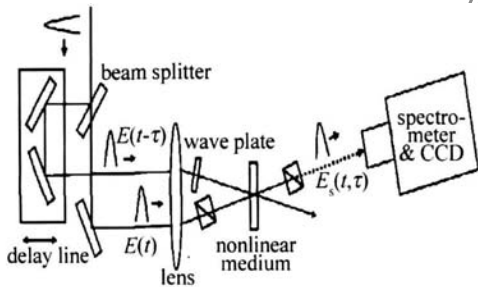


Fig 2 Schematic of PG-FROG device

两束, 一束作为探测脉冲通过一对正交偏振片, 另一束作为开关脉冲通过一个半波片, 将其偏振方向改变 45° , 然后探测脉冲与开关脉冲在非线性光学介质中交叠, 由于光克尔效应, 当开关脉冲与探测脉冲在时间上重合时, 这种效应会使探测脉冲的偏振方向发生改变, 从而会有一部分光通过正交的偏振片, 形成信号光, 信号光被光谱仪频率分辨, 最终成像在 CCD 上, 得到 PG-FROG 光谱图, 其数学表达式为:

$$I_{\text{PG-FROG}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E(t)|E(t-\tau)|^2 \exp(-i\omega t) dt \right|^2 \quad (2)$$

从上面的分析, 可以看到 SHG-FROG 和 PG-FROG 光

谱图在实验测量中通过光谱仪和 CCD 记录。已知两种 FROG 光谱图的数学表达式, 可以利用矩阵方法对其进行数值模拟, 图 3 和图 4 就是对几种常见脉冲两

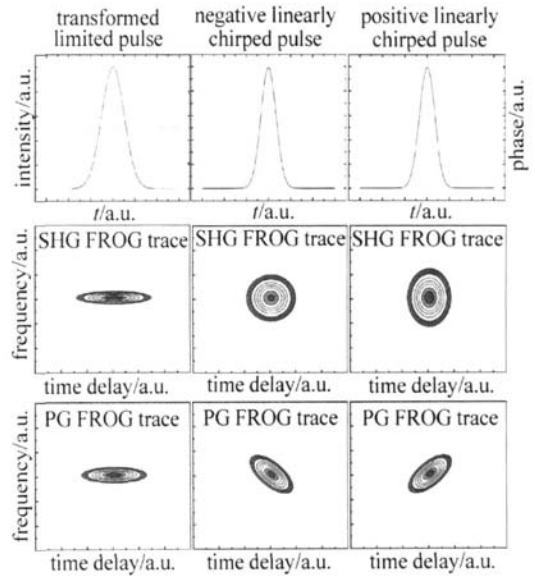


Fig 3 The SHG-FROG and PG-FROG beam geometries for transformed limited pulse positive linearly chirped pulse and negative linearly chirped pulse

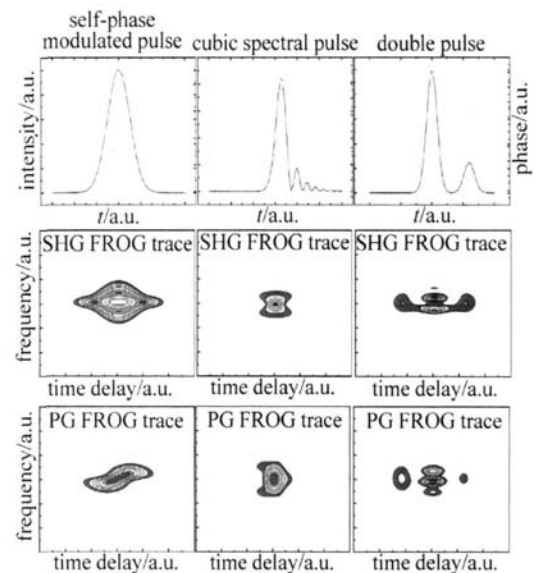


Fig 4 The SHG-FROG and PG-FROG beam geometries for self-phase modulated pulse cubic spectral pulse and double pulse

种 FROG 光谱图的模拟结果, 可以看出, SHG-FROG 光谱图具有关于频率和延迟的对称性, 而 PG-FROG 光谱图能够直观地看到脉冲频率随时间的变化关系, 对于线性正啁啾脉冲, 频率随时间增大, 在图中看到脉冲光谱图向上倾斜, 其对称中线代表频率随时间增加而增大; 对于线性负啁啾脉冲, 脉冲光谱图的对称中线代表频率随时间增加而减小。对于自相位调制脉冲, 其 PG-FROG 光谱图的中线成 S 型, 也定性地反映了脉冲频率随时间的变化关系。

2 从 SHG-FROG 光谱图提取超短脉冲的振幅和相位

在 SHG-FROG 实验装置中, 探测脉冲和开关脉冲经过倍频晶体产生的二次谐波信号为:

$$E_s(t, \tau) = E(t)E(t - \tau) \quad (3)$$

SHG-FROG 光谱图的数学表达式为:

$$I_{\text{SHG-FROG}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} E_s(t, \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2 \quad (4)$$

在 (4) 式中, 信号场 $E_s(t, \tau)$ 用关于时间延迟 τ 的傅里叶变换 $E_s(t, \Omega)$ 替换, 从而有:

$$E_s(t, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_s(t, \Omega) \exp(-i\Omega\tau) d\Omega \quad (5)$$

式中, Ω 为关于时间延迟 τ 作傅里叶变换的频率。

那么 SHG-FROG 光谱图的数学表达式变为:

$$I_{\text{SHG-FROG}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_s(t, \Omega) \exp(-i\omega t - i\Omega\tau) dt d\Omega \right|^2 \quad (6)$$

由 (6) 式知, 给定 FROG 光谱图提取脉冲振幅和相位的属于二维相位恢复问题, 可以利用二维相位恢复算法解决, 二维相位恢复的基本算法就是迭代傅里叶变换算法。

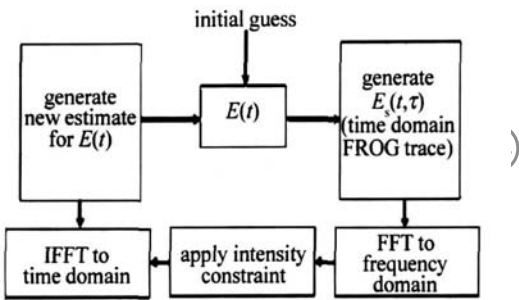


Fig 5 Schematic of the two-dimensional phase retrieval algorithm for FROG

如图 5 所示, 首先猜测起始脉冲电场值, 得到 FROG 时域信号场, 将其对时间作傅里叶变换获得频域信号场, 然后利用频率域限制, 用测量的 FROG 光谱图的强度值替换信号的强度, 再经傅里叶反变换, 得到迭代的时域信号场, 最后用时域限制, 得到下一次迭代的起始脉冲值, 重复上述过程, 直到 FROG 光谱图误差接近收敛标准 ($G < 10^{-4}$)。FROG 光谱图误差定义为:

$$G = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N |I_{\text{FROG}}^{(k)}(\omega_i, \tau_j) - I_{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_j)|^2 \quad (7)$$

式中, $I_{\text{FROG}}^{(k)}(\omega_i, \tau_j)$ 为第 k 次迭代的起始脉冲电场值计算得到的光谱图强度值, $I_{\text{FROG}}(\omega_i, \tau_j)$ 为 FROG 光谱图的强度测量值。在迭代傅里叶变换算法的基础上, 引进了基于矩阵运算的 PCGPA, 采用 MATLAB 语言编程, 从上文数值模拟的 SHG-FROG 光谱图, 提取出超短脉冲的振幅和相位, 如图 6 所示。可以看出提取的

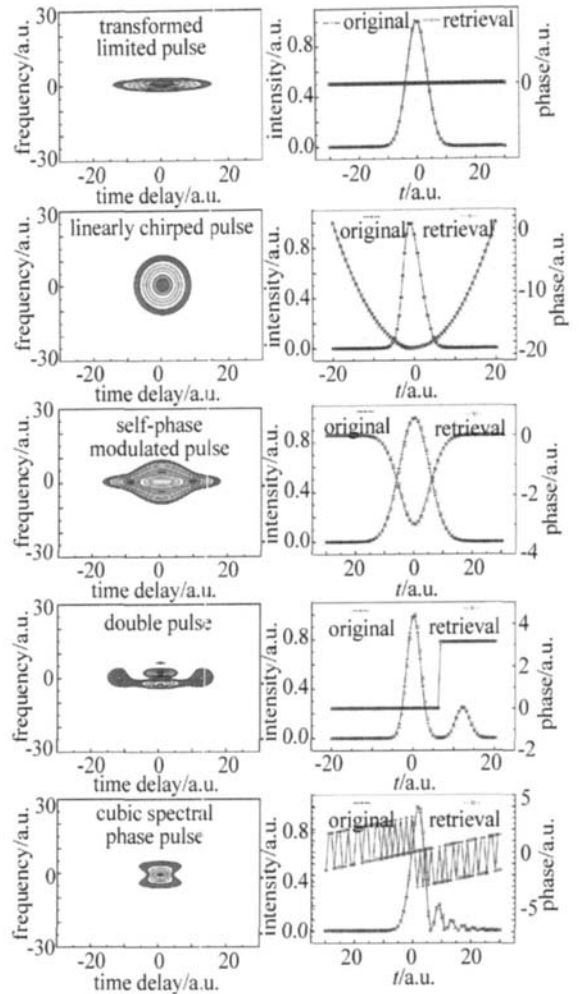


Fig 6 Retrieved intensity and phase from SHG-FROG trace

脉冲振幅和相位分布与原始脉冲的振幅和相位分布相当吻合, 只是对于立方光谱相位脉冲的相位提取没有完全重合, 但是, 相位分布的轮廓是一致的。而且从图 7 可以看到, 线性啁啾脉冲在算法迭代 18 次时 G 达到

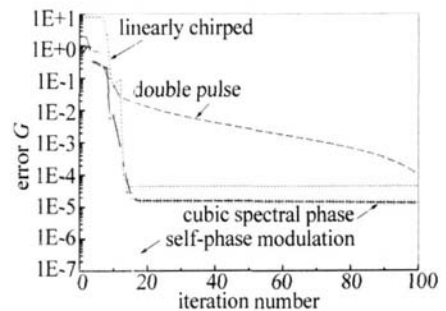


Fig 7 SHG-FROG error as a function of iteration number for different pulses

了 4.4672×10^{-5} ; 立方光谱相位脉冲在算法迭代 14 次达到了收敛的标准, G 最小能达到 1.318×10^{-5} , 自相位调制脉冲收敛情况更好, G 可以达到 3.7004×10^{-7} ; 然而对于双脉冲达到收敛标准需要迭代更多的次数, 但 G 最终也能够达到 9.4784×10^{-5} ; 总之, PCGPA 运行稳定, 收敛很快, 是 FROG 一种有效的算法。

3 结 论

作者总结了两种类型 FROG 测量超短脉冲的实验装置, 并利用矩阵方法数值模拟了两种类型的 FROG 光谱图, 对其进行了分析, 而且表明从 FROG 光谱图上能够反映出脉冲形状的复杂程度以及频率随时间的变化情况。并对数值模拟的 SHG-FROG 光谱图, 利用 PCGPA 对其进行脉冲的提取, 得到了超短脉冲的振幅和相位分布。在用 PCGPA 提取超短脉冲的过程中, 发现 PCGPA 是一种快速稳定的算法, 尤其对复杂脉冲的提取能够很快达到收敛的标准。在文献 [10] 中, 将 PCGPA 和数字信号处理技术结合, 实验上建立了一套飞秒示波器的装置, 对 64×64 像素的 SHG-FROG 光谱图提取待测脉冲, 提取脉冲时间非常短, 只用 0.8s , 光谱图误差小于 0.5% 。因此, 利用 PCGPA 可以完成对超短光脉冲进行精确实时地测量。

参 考 文 献

- [1] YU Y L, MU C J, BAI J T, *et al*. The design of a new multilayer blazed reflective grating used in broadening femtosecond lasers [J]. *Laser Technology* 2005, 29(4): 358-360 (in Chinese).
- [2] CHILLA J L A, MARTNEZ O E. Analysis of a method of phase measurement of ultrashort pulses in the frequency domain [J]. *IEEE J Q E*, 1991, 27(5): 1228-1235.
- [3] RHEE J K, SOSNOWSKI T S, TIEN A C, *et al*. Real time dispersion analyzer of femtosecond laser pulses with use of a spectrally and temporally resolved upconversion technique [J]. *JO SA*, 1996, B13(8): 1780-1785.
- [4] TREBNO R, KANE D J. Using retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency resolved optical gating [J]. *JO SA*, 1993, A10(5): 1101-1111.
- [5] KANE D J, TREBNO R. Characterization of arbitrary femtosecond pulse using frequency-resolved optical gating [J]. *IEEE J Q E*, 1993, 29(2): 571-579.
- [6] LONG J H, GAO J H, JU Y F, *et al*. Measuring the amplitude and phase of ultrashort pulses using SHG-FROG [J]. *Acta Photonica Sinica* 2002, 31(10): 1293-1296 (in Chinese).
- [7] DELONG K W, TREBNO R, KANE D J. Comparison of ultrashort pulse frequency-resolved optical gating traces for three common beam geometries [J]. *JO SA*, 1994, B11(9): 1595-1608.
- [8] KANE D J, TREBNO R. Single-shot measurement of the intensity and phase of an arbitrary ultrashort pulse by using frequency-resolved optical gating [J]. *Opt Lett* 1993, 18(10): 823-825.
- [9] KANE D J, TAYLOR A J, TREBNO R, *et al*. Single-shot measurement of the intensity and phase of femtosecond UV laser pulse using frequency-resolved optical gating [J]. *Opt Lett* 1994, 19(14): 1061-1063.
- [10] DELONG K W, FITTING O D N, TREBNO R. Pulse retrieval in frequency-resolved optical gating based on the method of generalized projections [J]. *Opt Lett* 1994, 19(24): 2152-2154.
- [11] KANE D J. Real time measurement of ultrashort laser pulse using principal component generalized projections [J]. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics* 1998, 4(2): 278-283.
- [11] CANHAM L T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers [J]. *A P L*, 1990, 57(10): 1046-1048.
- [12] LAO L Sh, BAO X M, MIN N B. Two kinds of photoluminescence spectra in porous silicon [J]. *Journal of Semiconductor* 1995, 16(2): 145-148 (in Chinese).
- [13] LU Y L, LU Y C, YANG H, *et al*. The optical properties of ZnO films grown on porous Si templates [J]. *J Phys* 2003, D36(21): 2705-2708.
- [14] ZHANG P, KIM P S, SHAM T K. Nanostructured CdS prepared on porous silicon substrate: structure, electronic, and optical properties [J]. *JA P*, 2002, 91(9): 6038-6043.
- [15] XU D Sh, GUO G L, GUIL L. Controlling growth and field emission property of aligned carbon nanotubes on porous silicon [J]. *A P L*, 1999, 75(4): 481-484.
- [16] FAN Sh Sh, CHAPLINE M G. Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties [J]. *Science* 1999, 283(5401): 512-515.
- [17] GOKARNA A, BHORASKAR S V, PAVASKAR N R, *et al*. Optoelectronic characterization of porous silicon/CdS and ZnS systems [J]. *Physics Status Solidi* 2000, A182(1): 175-179.
- [18] CHEN Q W, ZHU D L, ZHU C. A way to obtain visible blue light emission in porous silicon [J]. *A P L*, 2003, 82(7): 1018-1020.
- [19] PROKES S M, FREITAS JA, JR, SEARSON P C. Microluminescence depth profiles and annealing effects in porous silicon [J]. *A P L*, 1992, 60(26): 3295-3297.

(上接第 130 页)

- [4] JU Zh X, ZHANG B L, YAO N. ZnS thin film deposited by pulsed lasers and its luminescent characteristic [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 620-624 (in Chinese).
- [5] MOROZOVA N K, KARETKOV IA, PLOTNIHENKO V G, *et al*. Transformation of luminescence centers in CVD ZnS films subjected to a high hydrostatic pressure [J]. *Semiconductors* 2004, 38(1): 36-41.
- [6] CHEN SY, ZENGM G, WANG Sh J, *et al*. Fabrication of the ZnS thin film electroluminescence devices on silicon substrate [J]. *Journal of Ximen University (Natural Science)*, 2003, 42(6): 723-726 (in Chinese).
- [7] BANDIC Z Z, PIQUETTE E C, MCCALDIN JO, *et al*. Solid phase recrystallization of ZnS thin films on sapphire [J]. *A P L*, 1998, 72(22): 2862-2864.
- [8] MCCAMY JW, LOWNDES D H, BUDA I J D, *et al*. Epitaxial ZnS films grown on GaAs(001) and(111) by pulsed laser ablation [J]. *J A P*, 1993, 73(11): 7818-7822.
- [9] GOKARNA A, PAVASKAR N R, SATHAYE S D, *et al*. Electroluminescence from heterojunctions of nanocrystalline CdS and ZnS with porous silicon [J]. *JA P*, 2002, 92(4): 2118-2124.
- [10] XING D S, SHI J X, GONG M L, *et al*. Luminescence modulation of porous silicon-zinc sulfide nanocomposite by in situ synthesis of zinc sulfide [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities* 2004, 25(1): 24-26 (in Chinese).