

飞秒激光脉冲的谐波频率分辨光学开关法测量研究*

王兆华 魏志义† 滕浩 王鹏 张杰

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

(2002 年 6 月 27 日收到, 2002 年 7 月 18 日收到修改稿)

建立了一台谐波频率分辨光学开关法(FROG)飞秒脉冲测量装置,利用该装置进行了掺钛蓝宝石飞秒激光脉冲的测量研究.在二次谐波自相关测得的时域和频域信号基础上,结合对信号光强度分布的计算机迭代处理,得到了有关飞秒激光电场、光谱及其相位的信息,所得脉宽与干涉测量的结果基本一致.

关键词:频率分辨光学开关法(FROG),迭代计算,飞秒激光,自相关

PACC:4260,4265F

1. 引言

十几年来,飞秒激光技术以前所未有的发展速度,不断创造最短脉宽的世界纪录,成为自然科学领域里最具突破性成果的前沿研究内容之一.目前国际上已有多个研究小组采用不同的技术方案先后分别得到了脉宽不到两个光学周期的掺钛蓝宝石激光脉冲^[1-4].如何精确测量如此短的激光脉冲,成为具有挑战性的研究内容.虽然传统的干涉自相关法可以用来准确地测量数十飞秒量级的超短脉冲,但对于短于 10fs 的激光而言,由于自相关法不能提供脉冲的相位、带宽、载波波长等信息,因此无法令人信服地相信其所推断出的实际脉冲宽度.为了实现极短激光脉冲的准确测量,人们进行了长时间的探索,先后提出了许多不同的测量方法,如频率域相位测量(FDPM)^[5]、频域和时域分辨转换技术(STRUT)^[6,7]、光谱成分的时域分析(TASC)^[8]、频率分辨光学开关法(FROG)^[9-11]等.本文在对频率分辨光学开关法探讨和研究的基础上,设计建立了一台基于二次谐波频率分辨光学开关法的测量装置,并用其对我们自建的飞秒掺钛蓝宝石激光进行了测量.

2. 频率分辨光学开关法

频率分辨光学开关法(frequency-resolved optical

gating, FROG)是由 Kane 和 Trebino 提出的^[9,10],该方法是在普通自相关法的基础上,通过对测得的自相关信号进行频率分辨,并引入脉冲迭代算法对飞秒脉冲进行测量分析而能同时得出脉冲宽度、光谱宽度、电场形状、光谱形状以及相应的相位等信息的一种新型飞秒脉冲诊断技术.其基本过程是:首先将入射光脉冲分为两束,其中一束作为探测光,另一束作为开关光,并将作为开关的光束引入一个时间延迟 τ ,然后再让两束光通过非线性介质产生相互作用,经光谱仪进行光谱展开后,用 CCD 进行测量,从而得到相互作用后的光强信息.在此结果基础上利用脉冲迭代算法^[10],就可以得到入射光脉冲比较详细的信息.

脉冲迭代算法的目的就是找到入射光脉冲电场 $E(t)$ 的结构分布,以得到脉冲的详细信息.实验中,将入射光分为探测光 $E(t)$ 和光开关 $g(t-\tau)$,其中 τ 为两束光之间的相对延时,这样探测光与光开关相互作用所产生的信号光 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 可表示为

$$E_{\text{sig}}(t, \tau) = KE(t)g(t-\tau), \quad (1)$$

经傅里叶变换后,其频率分辨的强度为

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

此即为实际探测到的信号光强度分布,可以看出这是一个与时间和频率有关的二维函数,对此结果的迭代运算即可同时得出脉冲的宽度和光谱信息.

上面的方程给了两个约束条件(1)和(2).在位

* 国家基础研究重大研究计划(批准号:G1999075202-2)和国家高技术惯性约束聚变主题资助的课题.

† wzhy@aphy.iphy.ac.cn

相迭代算法中,如果已知开关函数 $g(t-\tau)$,可以先假定一个初始脉冲电场 $E(t)$ (如高斯脉冲),利用约束条件(1)得到信号场,将信号场代入约束条件(2),可以算出强度分布 $I_{\text{FROC}}(\omega, \tau)$,然后再与实验测量到的强度分布 $I(\omega, \tau)$ 比较,修改由计算得到的强度分布 $I_{\text{FROC}}(\omega, \tau)$.修改有好多种方法,比如,可以用 $|I(\omega, \tau) - I_{\text{FROC}}(\omega, \tau)|/2$ 代替 $I_{\text{FROC}}(\omega, \tau)$;再将修改后得到的信号值做反傅里叶变换得到一个新的

脉冲电场 $E(t)$,完成一次迭代(傅里叶变换得到的实部为强度值,虚部为相位);然后再将新得到的电场代入约束条件(1),重复上述步骤直到计算出的强度分布与测量得到的强度分布之间的均方根误差小到能使人接受的程度(如 10^{-3}).如此经过多次迭代,最终能得到一个非常接近实际脉冲形状的电场.整个迭代算法流程图如图1所示.

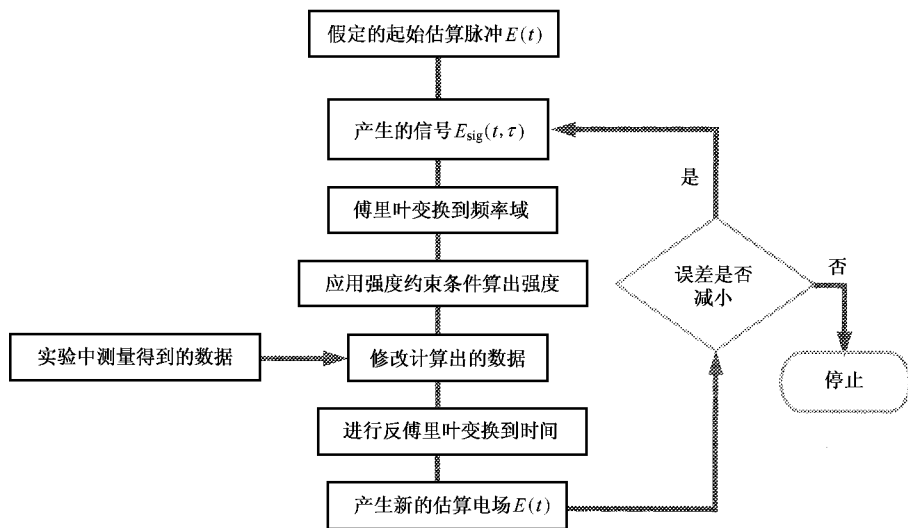


图1 迭代算法的流程图

3. 实 验

图2为本文采用的二次谐波频率分辨光学开关法实验测量图,待测的光源为自建的飞秒掺钛蓝宝石激光器^[12],所用抽运源为美国 Spectra-Physics 公司的 Millennia 激光,在 5W 的 532nm 绿光抽运下,该钛蓝宝石激光可输出 530mW 的稳定飞秒光脉冲^[13].测量中我们采用 1mm 厚的半透半反镜将飞秒脉冲激光等分成两束,令一束通过一个延迟线,作为开关光 $E(t-\tau)$;另外一束光经过两片全反镜反射后与开关光平行,作为探测光 $E(t)$;然后用聚焦透镜将这两束光聚焦到一块 $100\mu\text{m}$ 厚的 BBO 晶体上,调节开关光延迟时间让两束光在时间上完全重合,此时在 BBO 晶体后面就会有蓝色的和频光出现,此即为信号光 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$.根据非线性光学的原理,不难理解 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 应满足如下的关系:

$$E_{\text{sig}}(t, \tau) \propto E(t)E(t-\tau), \quad (3)$$

将信号光入射到光谱仪中,并用 1024×252 像元的

面阵 CCD 进行探测,就得到了随频率分布的信号光强度.在该实验中,由于我们采用倍频晶体作为非线性介质,利用产生的二次谐波作为信号,因此该实验方法被称为二次谐波频率分辨光学开关法^[14].

4. 实验结果和讨论

用 CCD 探测到信号光强度分布后,为了迭代算法中数据处理的需要,要对 CCD 进行标定;由于使用的光谱仪是波长已经标定好的标准商用产品,因此不需要再进行频率域的标定;需要标定的仅是时间延迟 τ .在实验中,我们在开关光路上引入 $20\mu\text{m}$ 的空间延迟,由自相关法的时间空间关系

可以得到

$$\text{时间延迟} = \frac{\text{空间延迟}}{\text{光速}} \times \text{强度自相关积分因子}$$

$$\Delta\tau = \frac{20 \times 10^{-6}}{3 \times 10^8} \times 0.65 \approx 43 \text{ fs}.$$

这样在两束光作用的过程中就会引入约 43fs 的时间延迟,相应的信号光在 CCD 像面上就会有大大

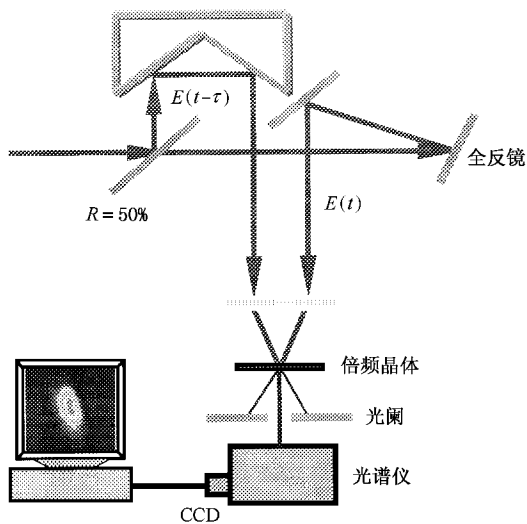


图 2 二次谐波频率分辨光学开关法实验装置图

约 29 个像元的空间位移,这样就意味着 CCD 像面上的每个像元大约对应着 1.5fs 的时间尺度.经过标定后,我们就可以根据信号光在 CCD 像面上分布的像元数估算出时间延迟 τ .图 3 是在实验中探测到的信号光强度的典型分布之一.

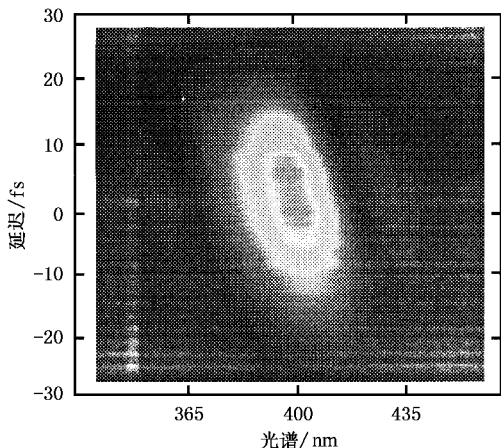


图 3 实验中测到的信号光强度分布

将上述实验数据引入迭代算法,输入到迭代程序中,经过多次迭代运算,就可以得到有关探测光的电场强度及相位分布、光谱强度及相位分布、脉冲宽度、光谱宽度等信息.图 4 为我们经过迭代后得到的电场强度及其相位分布图.

图 4 中显示,由该激光器输出的飞秒激光电场并不是十分严格的高斯脉冲或者是双曲正割脉冲,而是带有一些波形畸变,脉冲内部各部分的相位分布并不一致,随时间呈现出近似线性的变化,这也就

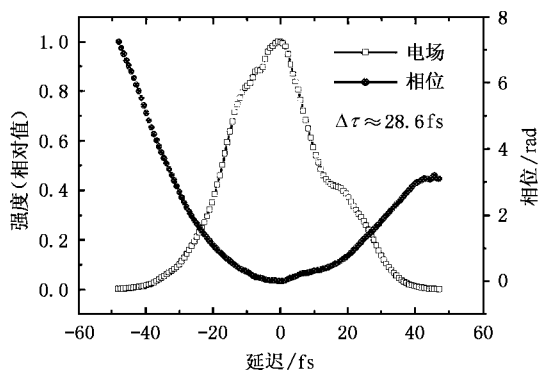


图 4 迭代后的脉冲电场强度及其相位

是通常所说的线性啁啾^[15],它可能是由于腔内的色散补偿不够完全,也可能是激光通过倍频晶体引起的色散展宽.图中还显示脉冲宽度大约 28.6fs ,这是由迭代程序直接给出的结果.图 5 为迭代计算出的对应的光谱信息,结果表明光谱的半高宽为 58.8nm ,中心波长光谱分布在 810nm 附近,光谱分布近似为高斯型,各光谱组元的相位基本成线性变化,表现出线性啁啾,与电场中反应出的啁啾信息基本一致.

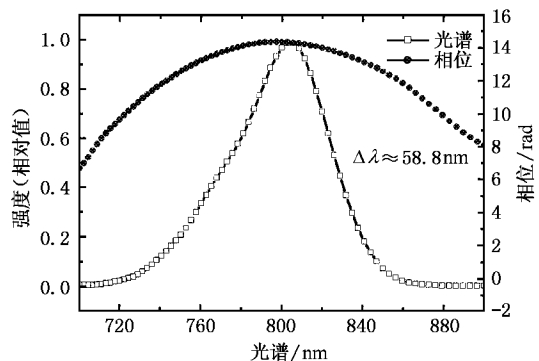


图 5 迭代后的光谱强度及其相位

由高斯型飞秒激光时间带宽积的关系^[16,17],我们可以估算出对于 58.8nm 的光谱,其能够支持大约 16fs 的理想脉冲宽度,而实际的测量结果却是 28.6fs ,究其原因,可能是由于色散没有完全补偿所致,从上两图中的相位关系中也可以看出这一点.由于我们在振荡器增加了三片折叠镜以追求器件的紧凑性,因此所导致的色散补偿的不完全是脉冲未能达到转换极限的主要原因.为了验证这一脉宽结果的准确性,我们又用干涉自相关仪对激光器脉宽进行了单独测量^[18],图 6 为所得到的测量结果,显示激光脉冲的宽度约 25fs .由于干涉自相关不能给出

准确的相位信息,考虑到色散等因素引入的脉冲畸变,其结果与频率分辨光学开关法所迭代推算出的结果在误差允许的范围内是合理一致的。

5. 结 论

使用二次谐波频率分辨光学开关法对飞秒激光脉冲进行了测量分析,结合迭代算法对所得的频率分辨的自相关信号强度分布的计算机处理,得到了有关飞秒激光时间形状、光谱结构、相位分布、脉冲宽度及光谱宽度等全面反映飞秒激光特性的信息。在此基础上通过与干涉自相关法结果比较,验证了该实验方法的可靠性。由于频率分辨光学开关法能够给出比较准确的相位信息,它可以分析飞秒激光放大系统的色散补偿情况^[19],分析光学材料的色散特性对飞秒激光的影响,探测一些物理过程中的相位变化,因此具有很好的实用价值。

感谢天津大学张志刚教授和复旦大学朱鹤元副教授的有益讨论和本所冯宝华研究员等人的热情帮助。

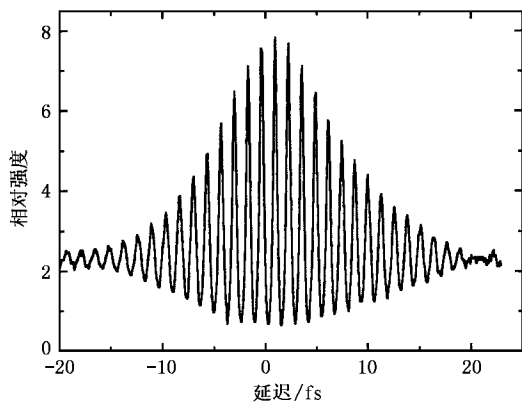


图6 干涉自相关测量结果

- [1] Steinmeyer G, Sutter D H *et al* 1999 *Science* **286** 1507
- [2] Baltuska A, Wei Z Y, Pshenichnikov M S *et al* 1997 *Optics Letters* **22** 102
- [3] Morgner U, Kartner F X *et al* 2001 *Optics Letters* **26** 373
- [4] Baltuska A, Takao F J, Kobayashi T *et al* 2002 *Optics Letters* **27** 306
- [5] Chilla L A, Martinez O E *et al* 1991 *Optics Letters* **16** 39
- [6] Rhee J K, Sosnowski T S, Tien A C, Norris T B *et al* 1996 *J. Opt. Soc. of America. B* **13** 1780
- [7] Tan H S, Schreiber E, Warren W S *et al* 2002 *Optics Letters* **27** 439
- [8] Wong V, Walmsley I A *et al* 1997 *J. Opt. Soc. of America B* **14** 944
- [9] Kane D J, Trebino R *et al* 1993 *IEEE J. Quantum Electronics* **29** 571
- [10] Kane D J, Trebino R *et al* 1993 *Optics Letters* **18** 823
- [11] Trebino R, Kane D J *et al* 1993 *J. Opt. Soc of America A* **10** 1101
- [12] Yang H, Wei Z Y, Zhang J *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1930 [in Chinese] 杨 辉、魏志义、张 杰等 2001 物理学报 **50** 1930]
- [13] Wei Z Y, Zhang J, Xia J F *et al* 2000 *Science in China* **43** 1083
- [14] Baltuska A, Pshenichnikov *et al* 1999 *IEEE J. Quantum Electronics* **35** 459
- [15] Reid D T, Cormack I G *et al* 2002 *Optics Letters* **27** 658
- [16] Diels J C M, Fontaine J J, Memichael I C *et al* 1985 *Applied Optics* **24** 1270
- [17] Diels J C, Rudolph W *et al* 1995 *Ultrashort Laser Pulse Phenomena* (New York America :Academic Press) p383
- [18] Xia J F Wei Z Y *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 946
- [19] Zhang Z G, Shun H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1080 [in Chinese] 张志刚、孙 虹 2001 物理学报 **50** 1080]

Measurement of femtosecond laser pulses using SHG frequency-resolved optical gating technique^{*}

Wang Zhao-Hua Wei Zhi-Yi[†] Teng Hao Wang Peng Zhang Jie

(*Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

(Received 27 June 2002 ; revised manuscript received 18 July 2002)

Abstract

We present a measurement of femtosecond laser pulses using the technique of second harmonic generation frequency-resolved optical gating (FROG) in this paper. Based on the data of the correlation signal in time and frequency domains , we obtained the detailed information on pulse shape , bandwidth , pulse duration and phase by using the retrieval algorithm program. The pulse duration is in reasonable agreement with the measurements using an interferometric autocorrelator.

Keywords : FROG , retrieval algorithm , femtosecond laser , autocorrelation

PACC : 4260 , 4265F

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G1999075202 - 2) and by the National High Technology Development Program of China .

[†] wzhy@aphy. iphy. ac. cn