

飞秒激光脉冲的频率分辨偏振光学开关法测量研究*

王兆华 魏志义† 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100080)

(2004 年 7 月 6 日收到, 2004 年 8 月 9 日收到修改稿)

建立了一台频率分辨偏振光学开关(PG-FROG)法飞秒脉冲测量装置,利用该装置对“极光 II 号”飞秒激光放大系统进行了测量.在利用偏振光学开关法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,并且对系统工作在不同状态时的激光脉冲进行了测量和比较分析,给出了有关该系统较详细的电场、光谱、相位以及啁啾状况.结果显示,当系统工作在零啁啾附近时,该系统输出的激光脉冲的电场、光谱和相位分布较规则,相位起伏较小;当系统偏离零啁啾状态时,虽然电场和光谱变化不很明显,但相位分布变化剧烈.

关键词:频率分辨偏振光学开关(PG-FROG)法,飞秒激光,自相关

PACC:4260,4265F

1. 引 言

在过去的十几年里,飞秒激光技术以前所未有的发展速度,不断地改写着人们所能控制的时间尺度及所能得到的光场强度的世界纪录,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^[1-3].目前人们直接从飞秒激光振荡器所能得到的脉宽已小于 5fs,经过压缩后的光学脉冲脉宽已小于 4fs,如何精确测量如此短的激光脉冲,就成了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的脉冲宽度,但却不能给出脉冲的相位、带宽、载波波长等信息,因此无法对飞秒激光脉冲进行较全面的了解.为了实现极短激光脉冲较准确的测量,人们经过多年的探索,先后提出了许多不同的测量方法,如频率域相位测量(FDPM)^[4]、频域和时域分辨转换技术(STRUT)^[5,6]、光谱成分的时域分析(TASC)^[7]、频率分辨光学开关(FROG)法^[8-10]等.在以前的工作中,我们曾对二次谐波频率分辨光学开关(SHG-FROG)法进行过研究,给出了飞秒激光脉冲的电场、光谱以及相位分布^[11],但是由于二次谐波法是由两个对称的脉冲产生的二次非线性效应,不能有效地区分脉冲的前沿和后沿,也不能给出脉冲是正啁啾分布还

是负啁啾分布,因此具有一定的局限性.为了解决这一问题,我们设计建立了一台频率分辨偏振光学开关(PG-FROG)法测量装置,利用非对称的三阶非线性效应对激光脉冲进行了测量分析,并将其应用于“极光 II 号”飞秒激光放大装置,得到了该激光输出较全面的信息.本文将报道这一实验及结果.

2. PG-FROG 法

频率分辨光学开关法是由 Kane 和 Trebino 提出的^[8,9],该方法是在普通自相关法的基础上,通过引入光学开关函数,得到相关信号,并进行频率分辨,同时利用脉冲迭代算法对信号进行分析,而能同时给出有关待测脉冲的脉冲宽度、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.在这种方法中,有两个核心要素:一是脉冲迭代算法^[9],它对信号依据相应条件进行运算处理,最终给出脉冲的详细信息;另一是光学开关函数,光学开关函数直接决定了信号场的分布,不同的设计方案有不同的光学开关函数,因而会得到不同的信号场分布.

脉冲迭代算法的目的就是找到入射光脉冲电场 $E(t)$ 和 $E(\omega)$ 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 $g(t -$

* 国家自然科学基金(批准号:60225005)和国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1999075202-2)资助的课题.

† E-mail: wzhy@aphy.iphy.ac.cn

τ),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,其频谱的强度为

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

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,例如: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。

光学开关函数根据实验方案的不同而略有差异,并由此出现了许多不同的 FROC 方法^[10,43],例如产生二次谐波的 SHG-FROC;产生三次谐波的 THG-FROC;利用光学偏振方法的 PG-FROC;利用自衍射方法的 SD-FROC 等。虽然有如此多不同的方法,但是对于同一个飞秒脉冲而言,利用不同方法所测量得到的最后结果,如脉冲宽度、光谱宽度、相位信息等,基本一致。

PG-EROG 法利用激光的偏振特性,先将探测光通过一对正交偏振片,同时让开关光通过一个波片,将其偏振方向改变 45° ,然后开关光与探测光在非线性光学介质中交叠。由于光学克尔效应,开关光会在介质中引起双折射,当开关光与探测光在时间上重合时,这种效应会使得探测光的偏振方向发生改变,这样就会有一部分光通过正交的偏振片,此即为信号。

在这种方法中,光开关函数为

$$g(t, \tau) = |E(t - \tau)|^2.$$

光开关函数是一个实函数,没有附加的位相信息,它能给出较真实的脉冲信息。其光强分布为

$$I_{\text{FROC}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t) |E(t - \tau)|^2 \times \exp(-i\omega t) dt \right|^2.$$

从上式可以看出,开关函数和电场函数是两个不同的函数,在相互作用过程中,能够较详细地区分出光脉冲每一部分的信息。

3. 实验设置

图 1 为本文采用的频率分辨偏振光学开关法实验装置图,待测的光源为“极光 II 号”钛宝石飞秒激光放大系统^[12],该激光器的重复频率为 10Hz,输出激光的中心波长为 800nm,最高单脉冲能量为 640mJ。测量中选取强度适当的部分光束作为测量光,并采用 1mm 厚的 50% 分束镜将飞秒脉冲激光等分成两束光,令一束光通过一个波片和一个延迟线,作为开关光 $|E(t - \tau)|^2$;另一束光经过一对正交的偏振片,作为探测光 $E(t)$;然后用柱面透镜将这两束光聚焦到一块薄的非线性材料上,先调节两个偏振片,使得第二个偏振片后面没有激光输出,然后调节开关光延迟时间以及空间位置,使两束光在时间和空间上完全重合在非线性材料中,此时在第二个偏振片后面会有微弱的激光出现,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 $E_{\text{sig}}(t, \tau)$ 应满足如下关系:

$$E_{\text{sig}}(t, \tau) \propto E(t) |E(t - \tau)|^2. \quad (3)$$

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,就得到随频率分布的信号光强

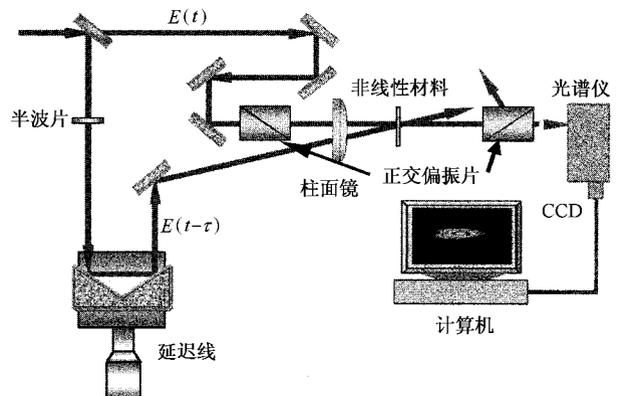


图 1 PG-FROC 法实验装置图

度.在该实验中,由于我们采用激光的偏振特性作为开关光,因此该实验方法被称为 PG-FROG 法^[8,13].

4. 实验结果与讨论

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;由于光谱仪的波长已经标定好,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 . 实验中在开关光路上引入 $20\mu\text{m}$ 的空间延迟,由自相关法的时间空间关系:

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

其中强度自相关积分因子是在自相关积分过程中出现的归一化常数,对于不同的脉冲形状,对应于不同的数值,如对于双曲正割脉冲,其数值约为 $0.65^{[11]}$. 因此,可得

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

这样在两束光作用的过程中就会引入约 43fs 的时间延迟,相应的光信号在 CCD 像面上就可以观

察到约有 14 个像元的空间位移,这就意味着 CCD 像面上的每个像元约对应着 3fs 的时间尺度. 经过标定后,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 2 为在实验中探测到的信号光强度的典型分布之一.

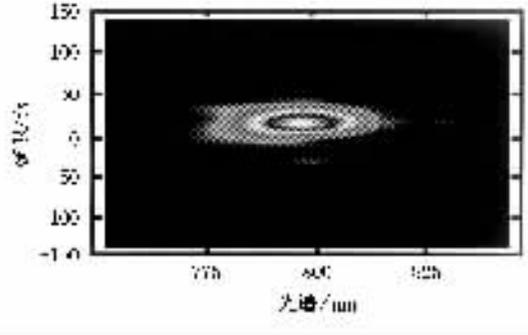


图 2 实验中测到的零啁啾激光脉冲信号分布图

将上述实验数据引入迭代算法,输入迭代程序,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 3 为经过迭代后得到的电场强度和光谱强度及它们的相位分布图.

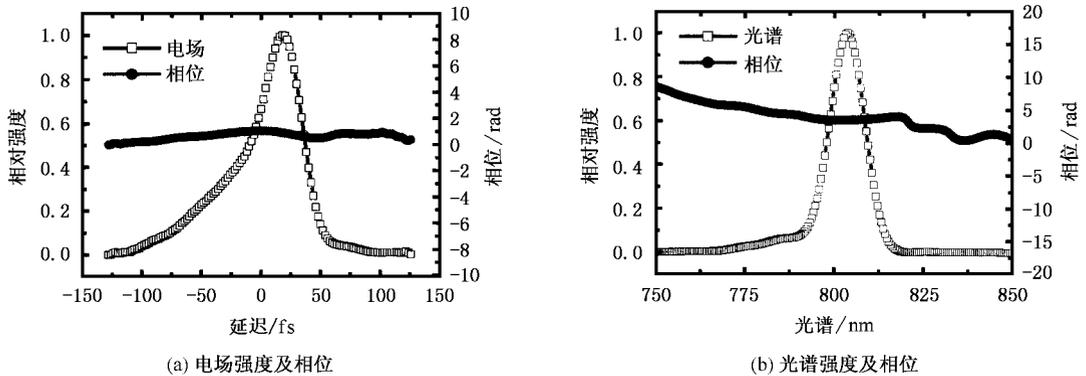


图 3 迭代后的零啁啾激光脉冲电场强度和光谱强度及其相位分布图

图 3 显示,当该激光系统工作在零啁啾状态时,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^[14],而是带有一些波形畸变;脉冲内部各部分的相位分布却非常一致,各个位置都处于零相位状态^[15];光谱分布较规则,虽然相位有一些变化,但在有效的光谱区域内还是非常一致. 图 (a) 中还显示脉冲宽度约为 42fs ,这是由迭代程序直接给出的结果. 图 (b) 为迭代计算出的对应的光谱信息,结果表明光谱的半高宽约为 27nm ,中心波长光谱分布在 800nm 附近.

当改变压缩器中光栅对的距离时,系统的工作

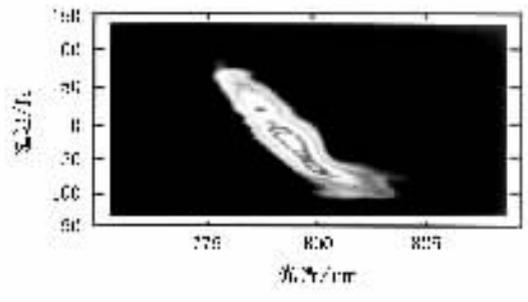


图 4 带啁啾信息的激光脉冲信号分布图

状态就发生了改变,输出的激光脉冲出现了啁啾变

化,甚至无规则分布状态,当用 PG-FROG 法监测系统时,就能反映出系统的这些变化.图 4 为测量得到的带啁啾信息的激光脉冲信号分布图.

将上述实验数据输入迭代程序,经过多次迭代

运算,就可以得到在这种情况下有关探测光的详细信息.图 5 为经过迭代后得到的电场强度和光谱强度及其相位分布图.

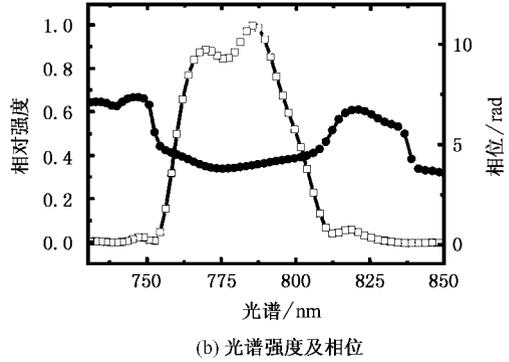
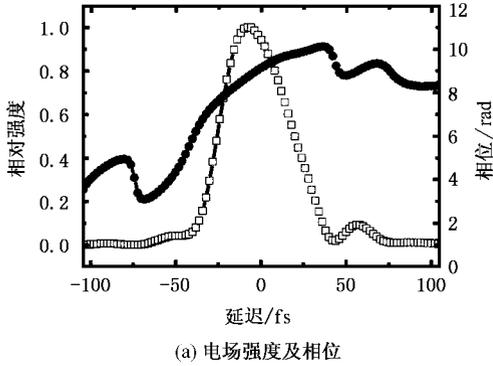
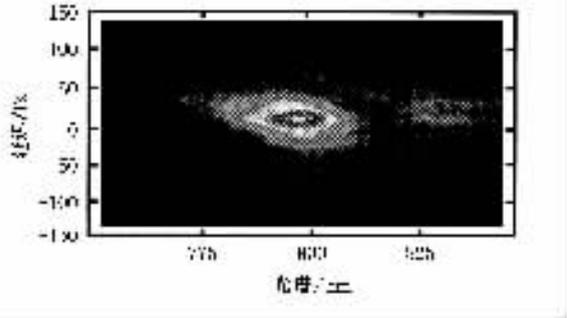


图 5 迭代后的带啁啾激光脉冲电场强度和光谱强度及其相位分布图 图注同图 3

图 5 显示,当该激光系统工作在有啁啾状态时,虽然输出的飞秒激光的电场分布变得较规则,但相位却有很大变化,各部分的分布不再一致,而有了先后的区分.相位的不一致也使得两束光在非线性材料中发生频率转换时,相互作用后的光谱变宽,同时偏离了中心波长的位置.此时的激光脉冲虽然带有啁啾,但相位还是呈现出一定的线性分布,具有一定的规则可循;当激光脉冲携带更多的啁啾量时,电场及相位分布就变得不很规则.进一步改变压缩器参数,得到了携带更多啁啾量的脉冲,图 6 为在这种情况下得到的激光脉冲信号分布图.

得到有关探测光的详细信息.图 7 为经过迭代后得到的电场强度和光谱强度及其相位分布图.



将该数据输入迭代程序进行迭代运算,就可以

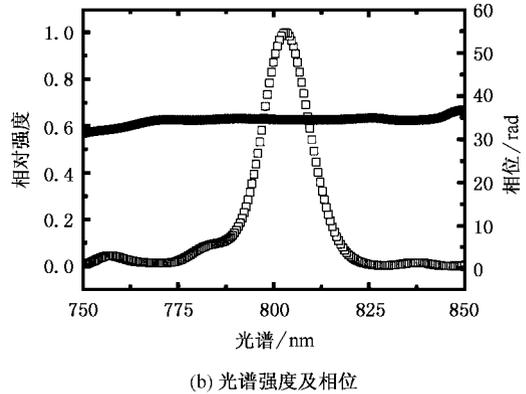
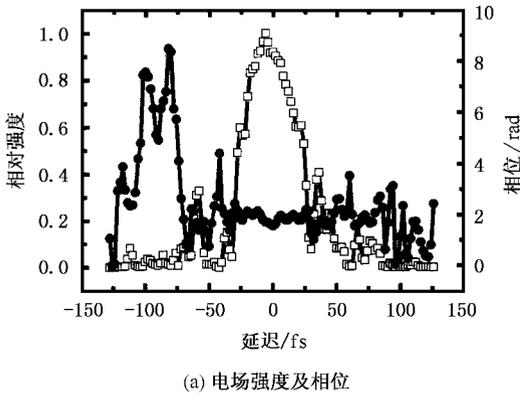


图 7 迭代后的带啁啾激光脉冲电场强度和光谱强度及其相位分布图 图注同图 3

图 7 显示,当该激光脉冲带有更多的啁啾量时,激光的电场分布也不规则,相位有很大的起伏,各部

分的分布很不一致;虽然光谱形状和相位分布较规则,但相位量却有很大的数值,这说明激光脉冲在压

缩过程中没有恢复到零啁啾状态,虽然光谱分布较一致,但电场分布却杂乱无章,此时的激光工作状态十分不好.

因此,利用 PG-FROG 法对激光系统进行监测分析,可以清楚地知道激光系统的详细工作状态,这对于激光系统的维护运行和物理实验工作的开展具有十分重要的意义.

5. 结 论

本文利用 PG-FROG 法对“极光 II 号”钛宝石飞秒激光放大系统进行了测量分析,结合迭代算法对所得到的具有频率分辨的自相关信号进行计算机处

理,得到了激光系统在不同工作状态下的有关激光脉冲时间形状、光谱结构、相位分布、脉冲宽度和光谱宽度等全面反映飞秒激光特性的信息.结果显示,当系统工作在零啁啾附近时,该系统输出的激光脉冲的电场、光谱和相位分布较规则,相位起伏较小;当系统偏离零啁啾状态时,虽然电场和光谱变化不是很明显,但相位分布变化剧烈.因此与其他测量方法比较起来,PG-FROG 法能够非常准确直观地反应出激光脉冲相位的变化.正是基于这一点,利用该法可以分析飞秒激光放大系统的色散补偿情况^[16],分析光学材料的色散特性对飞秒激光的影响,以及探测一些物理过程中的相位变化等.因此 PG-FROG 法具有很好的实用价值.

[1] Steinmeyer G *et al* 1999 *Science* **286** 1507

[2] Baltuska A *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 102

[3] Baltuska A *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 306

[4] Chilla L A *et al* 1991 *Opt. Lett.* **16** 39

[5] Rhee J K *et al* 1996 *J. Opt. Soc. Am.* B **13** 1780

[6] Tan H S *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 439

[7] Wong V *et al* 1997 *J. Opt. Soc. Am.* B **14** 944

[8] Kane D J *et al* 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 571

[9] Kane D J *et al* 1993 *Opt. Lett.* **18** 823

[10] Trebino R *et al* 1993 *J. Opt. Soc. Am.* A **10** 1101

[11] Wang Z H *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 363 [in Chinese] 王兆华等 2003 *物理学报* **52** 363]

[12] Wei Z Y *et al* 2000 *Sci. China* **43** 1083

[13] Baltuska A *et al* 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 459

[14] Xia J F *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 946

[15] Reid D T *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 658

[16] Zhang Z G *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1080 [in Chinese] 张志刚等 2001 *物理学报* **50** 1080]

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

Wang Zhao-Hua Wei Zhi-Yi[†] Zhang Jie

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

(Received 6 July 2004 ; revised manuscript received 9 August 2004)

Abstract

A frequency-resolved optical gating (PG-FROG) with polarization gating technique is developed to diagnosis the characteristics of laser pulses generated from a 20-TW femtosecond laser amplifier. Based on the data of the correlation signal in time and frequency domains , we obtained the detail information on pulse shape , bandwidth , pulse duration and phase by using the retrieval algorithm. The measured results with different phase compensation are also presented and discussed.

Keywords : FROG , femtosecond laser , autocorrelation

PACC : 4260 , 4265F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60225005) and the State Key Development Program for Basic Research of China(Grant No. G1999075202-2).

[†]E-mail :wzhy@aphy. iphy. ac. cn