

·光电系统·

一种新型的全光固体分幅相机分幅方式的研究

袁芬芳¹, 刘希顺¹, 陈绍荣¹, 梁玲亮^{2,3,4}, 高贵龙^{2,3,4}

(1. 国防科技大学, 长沙 410073; 2. 中科院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子学国家重点实验室, 西安 710119; 3. 中国科学院大学, 北京 100039; 4. 西安交通大学 理学院物理系, 西安 710049)

摘要: 全光固体分幅相机技术是目前超快诊断技术领域最有前途的发展方向之一。因其在实现皮秒、亚皮秒量级时间分辨率、超高空间分辨率、拓宽探测信号波段范围、可靠性、稳定性、抗辐射抗干扰等方面拥有独特的优势, 引起了人们的广泛关注。文中将波分复用以及偏振复用技术应用到全光固体分幅相机系统中, 进行多分幅的方案研究, 在保证皮秒量级时间分辨率的前提下, 探索获得几幅到十几幅数的分幅方案。最终, 在实验上获得了空间分辨达到 60 lp/mm 的四分幅图像。实验结果显示, 对于波分分幅的时间分辨率为 1.414 ps, 偏振分幅的时间分辨率为 15 ps。

关键词: 超快诊断; 全光固体分幅相机; 线性啁啾; 波分分幅; 偏振分幅; 时间分辨; 空间分辨

中图分类号: TL816; O536

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-06-0001-04

Research on a Novel All-optical Solid Framing Camera Framing Mode

YUAN Fen-fang¹, LIU Xi-shun¹, CHEN Shao-rong¹, LIANG Ling-liang^{2,3,4}, GAO Gui-long^{2,3,4}

(1. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an 710119, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

4. Science College, Xi'an Transportation University, Xi'an 710049, China)

Abstract: All-optical solid framing camera technology is one of the most promising areas with the best developing future in ultrafast diagnosis technology. The technology is widely paid attention due to the unique advantages of time resolution realization at picosecond and sub-picosecond level, ultra-high spatial resolution, broadening the waveband range of detection signals, reliability, stability, anti-jamming and anti-radiation. Wavelength division multiplexing and polarization multiplexing technologies are applied to the all-optical solid framing camera system to the multi-framing schemeresearch. Under ensuring picosecond level time resolution, the framing schemes of acquiring several to tens of pieces of frames are explored. Four pieces of framing images with 60 lp/mm spatial resolutions are obtained through experiments. Experimental results show that time resolution of wave division framing is 1.414 ps and time resolution of polarization framing is 15 ps.

Key words: ultrafast diagnosis; all optical solid framing camera; linear chirp; wavelength division framing ; polarization framing; time resolution; spatial resolution

传统的超快诊断技术主要是指基于光电转换、时空映射的变像管条纹/分幅相机^[1-3], 受空间电荷效

收稿日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(10474105)

作者简介: 袁芬芳(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事计算机视觉与智能信息处理; 导师简介: 刘希顺(1962-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事计算机视觉与智能信息处理.

应以及光电阴极材料等限制,其发展遇到了瓶颈。随着超快光学技术的发展,超快诊断技术呈现多样化,如高速光示波器技术^[4-7],相关测量技术^[8-11],全光固体超快诊断技术以及一系列利用飞秒激光脉冲研究材料的非线性光学性质和超快响应过程的技术等。固体超快诊断技术有可能获得同时具备大动态范围、高时空分辨率的更高性能的探测手段,其在国防、材料、自然科学研究、检测分析等领域有很大的应用潜力。

2013年美国利弗莫尔实验室首次报道了固体分幅相机^[12],利用晶体双折射产生的寻常光和非寻常光作为探针光,从而获得了时间分辨为5 ps的两分幅图片,空间分辨率更是达到50 lp/mm以上。而最好的变像管分幅相机(16分幅)其时间分辨率在35 ps以上,空间分辨率10 lp/mm。国内,西安光机所超快诊断实验室也积极开展全光固体超快诊断技术的研究,全光固体条纹相机实验平台初步测试空间分辨率达到91 p/mm^[13]。文中首先对超快成像全光固体分幅相机的原理进行了简单的介绍,然后利用分偏振和分波长对全光固体分幅相机的分幅方式进行探索,并搭建实验平台进行四分幅方案的验证,与LLNL报道的两分幅方案相比,文中方案能实现更多的分幅数和更高的时间分辨。

1 研究内容

1.1 全光固体分幅相机原理

图1所示为全光固体分幅相机的基本原理。待探测超快光信号从正面打在半导体探测晶体上,在材料中注入非平衡自由载流子,诱导材料的折射率发生变化,如此即可将待探测超快光信号的瞬态空间强度信息不停的“写入”材料中,形成动态光栅,该瞬态光栅映射待探测信号光的时间、强度及空间信息;此时,具有特定时间间隔的探针光序列,从背面先后照射到被信号光激发的半导体材料上,序列中的各个子脉冲相继“读出”对应不同时刻的半导体探测晶体内的光栅图像,最后,对包含了不同时刻信号光信息的探针光序列进行空间展开得到多幅图像,并记录每幅图像对应某一时刻的信号光信息。

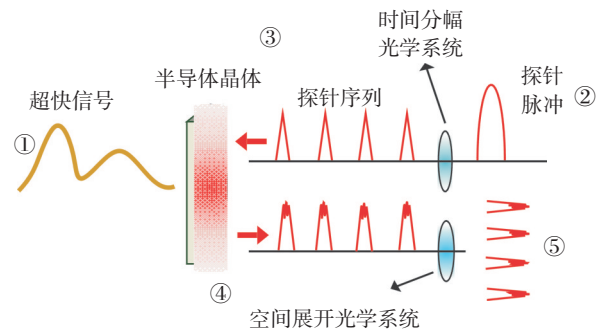


图1 固体分幅相机原理图。其中,①为待探测的超快信号;②为探针脉冲;③为经过探针光时间序列系统后被时序化的探针序列;④为携带了半导体光栅信息的探针序列;⑤为经过空间展开系统后需要记录的探针序列

全光固体分幅相机主要包括探针光时间序列化系统、探测半导体、空间展开系统和必要的控制系统和图像处理系统。其中对探针光进行时序化是实现分幅的前提和关键。探针光进行时间序列化,主要通过分波长、分偏振、分角度等手段实现。探针光序列的数目决定了分幅数,而序列的时间间隔反应时间分辨率。系统的时间分辨率,一方面由半导体探测晶体的响应时间决定;另一方面取决于探针光在探测晶体中的往返时间。目前,经过特殊生长条件的半导体材料的响应时间可以做到很短,达到皮秒,甚至飞秒量级。而系统的空间分辨率受光学系统影响不大,应主要取决于探测晶体材料的缺陷,半导体探测晶体衬底的表面形貌特性和均匀性对器件的空间分辨能力也有一定的影响。就目前来看,该固体分幅相机能达到皮秒,亚皮秒量级时间分辨率和极高的空间分辨率。如果采用分波长、分角度或级联式分偏振技术中的任何一种技术就可以实现20幅以上的分幅数。文中主要采用偏振分幅和波长分幅方式对探针光时间序列化及空间分幅系统进行研究。

1.2 偏振分幅原理

分偏振:将一束光垂直入射双折射晶体,其中晶体表面切成与光轴方向平行,会产生包含 o 光和 e 光的折射光线,在晶体中传播后, o 光和 e 光之间会存在固定的时间差,利用这一性质,可以将探针光脉冲分成具有一定时间间隔的两个脉冲。探针光

分偏振时间序列法原理如图2所示。

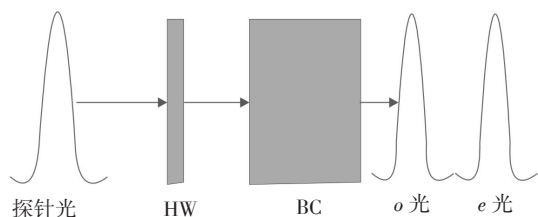


图2 探针光分偏振时间序列化原理

其中,HW为二分之一波片;BC为延迟晶体。Probe light为探针光。

以上讨论只是把探测脉冲在时间上进行展开,为了利于分幅,还需在空间进行展开。利用晶体的双折射性质,也可以完成探针光在空间展开。如图3所示的钽酸铋晶体,当一激光束正入射其表面时,可以看到 o 光沿原入射方向传播,而 e 光一般偏离原入射方向,且 o 光和 e 光出射的方向是平行的。

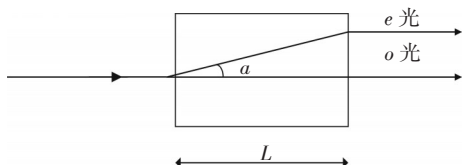


图3 钽酸铋晶体中双折射现象原理图

结合以上双折射晶体的性质,偏振分幅方案原理如图4所示。

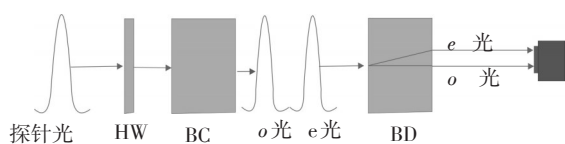


图4 偏振分幅原理图

其中,HW为二分之一波片;BC为延迟晶体;BD为位移晶体;CCD为相机。

如图4所示光路,探针光脉冲先经过延时晶体,在时间上分成具有特定时间间隔的两个脉冲,随后经过光束位移晶体,在空间上展开,最后在CCD上呈两分幅图像。偏振分幅能够通过设计晶体的参数,使脉冲光在时间和空间分开,但是它的缺点是只能把探针光时间序列化成两个脉冲,因此只能进行两分幅成像,对应待探测信号的两个时刻的信息。要进行多分幅,必须结合其他分幅方式。

1.3 波长分幅原理

分波长:探针光分波长时间序列化,主要采用激光线性啁啾技术,即是指将超短光脉冲经过色散介质,由于不同频率成分的速度不同,若为正常色散介质,高频波的折射率大,传播速度慢,而低频波的传播速度快,从而时域超短光脉冲波包中的不同时刻对应的频率不同,称为啁啾。这种变化可以是线性的,也可以是非线性的。本实验主要利用非线性光子晶体光纤产生的超连续谱来实现线性啁啾。利用光子晶体光纤实现分波长时间序列化的原理图如图5所示。

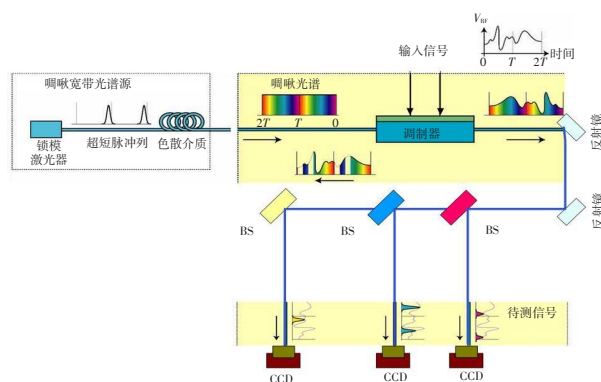


图5 波长分幅原理图

如图5所示,锁模激光发出的周期性超短脉冲,经过色散介质展宽后,变成线性啁啾信号。被待探测的模拟信号调制后,该线性啁啾信号的包络即为待探测的模拟信号,经过窄带滤波片滤波后,不同波长的信息分别在CCD上成像,通过提取CCD上面图像信息,就可以把待探测信号提取出来。

2 实验方案及结果分析

2.1 实验方案

对分幅相机进行原理的可行性验证,用分辨率板代替信号光写入半导体探测晶体中的光栅信息。在偏振分幅技术的基础上,结合线性啁啾技术,在光学系统中加入双折射晶体,半波片、光束偏移器即可将线性啁啾技术与偏振方案结合起来,可实现多分幅,以四分幅方案为例进行研究。

如图6所示的激光光源为由MaiTai激光振荡器发出的中心波长为800 nm,重频80 MHz的超短脉

冲激光,其中脉冲宽度为110 fs,光谱宽度5 nm。该超短脉冲激光作为泵浦光耦合到光子晶体光纤中,耦合采用×20倍的显微物镜,入射激光功率为2.25 W,在光纤出射端测得的功率为80 mW。利用光纤光谱仪测量从光纤出射的激光,发现光谱展开达到50 nm (FWHM)。采用一分束比为1:9的分束片将从光纤出射的激光分成两部分,光强弱的一部分进入FROG进行测量,另一部分经过一偏振片后打到延迟晶体上,偏振片使得其偏振方向与之后的延迟晶体的光轴成45°(作用是使得*o*光和*e*光的能量相等,调整偏振片从而调整了偏振方向与光轴的方向,可调节*o*光和*e*光的强度比例),出射后的激光分为*o*光和*e*光,二者时间差为15 ps。然后经过图像板,光束偏移器在空间上分开,最终分别通过800 nm和790 nm的滤波片在两个CCD上分别得到对应不同波长的两幅像分别对应*o*光和*e*光。图像板的分辨率为60 lp/mm。

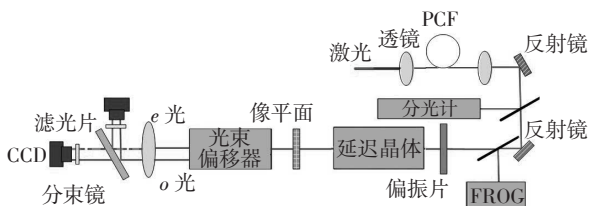


图6 偏振技术与啁啾技术相结合四幅原理图

2.2 实验结果与分析

图7为FROG得到的对经过光子晶体光纤展宽后的探针光光场进行重建后,重建电场的光强随频率和时间变化。其中 ph'' 是二阶相位系数。图7显示在14.184 nm的谱宽,对应的2.074 ps的时域范围内, ph'' 为常数,故为正的线性啁啾。线性啁啾信号常用式(1)表示。时域的瞬时频率公式为式(2)。

$$E(t) = E_0 \exp[-(t/\tau_c)^2] \exp[i(\omega_0 t + \beta t^2)] \quad (1)$$

$$\omega = \omega_0 t + \beta t^2 \quad (2)$$

其中, E_0 为脉冲电场振幅; τ_c 为脉冲持续时间; β 为啁啾量; ω_0 为载波频率。由式(2),790 nm和800 nm波长的光时间间隔约为 $\Delta t = 1.410$ ps。由此可以得到,利用啁啾得到波长分幅的时间分辨率为1.41 ps。

CCD记录的四分幅图像如图8所示。其中,图8a(1)、图8a(2)图分别是经过790 nm滤波片后的*o*光和*e*光、图8b(1)、图8b(2)分别是经过800 nm滤

光片后的*o*光和*e*光,他们时间排列顺序为b(2),a(2),b(1),a(1),图像出来先后顺序坐标如图9所示。由图看到,对应于空间分辨为60 lp/mm明暗相间的条纹,并且图8b比图8a三图像要亮,这是由于从光子晶体光纤出来的光波,800 nm的峰值比790 nm的要强。

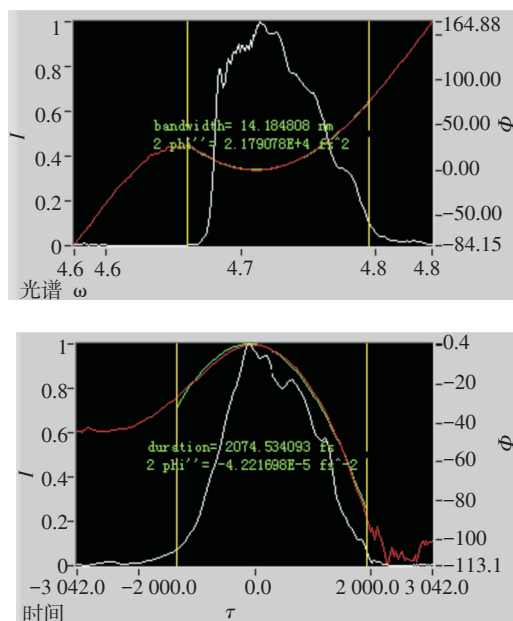


图7 通过场重建算法得到的探针光激光光场随频率和扫描时间的分布

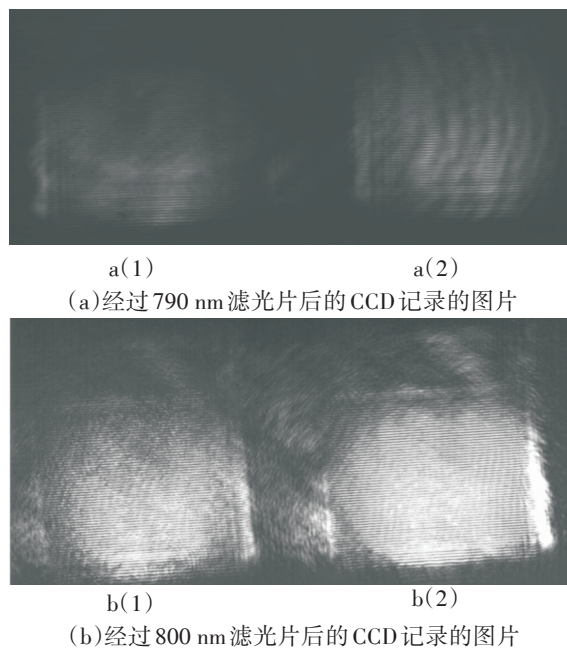


图8 两个CCD记录的四分幅图片,空间分辨率为60 lp/mm加790 nm滤波片的CCD记录的图片以及加800 nm滤波片的CCD记录的图片

(下转第8页)

- [3] Jia Y, Zheng X, Hu X, et al. Effects of colored noise on stochastic resonance in a bistable system subject to multiplicative and additive noise[J]. Phys. Rev. E, 2001,63:031107.
- [4] LUO Xiao-qin, ZHU Shi-qun. Stochastic resonance driven by two different kinds of colored noise in a bistable system [J]. Phys. Rev. E, 2003,67:021104.
- [5] Jirsa V K, Ding M. Will a large complex system with time delays be stable?[J]. Phys. Rev. Lett., 2004,93:070602.
- [6] Hasegawa H. Augmented moment method for stochastic ensembles with delayed couplings I Langevin model[J]. Phys. Rev. E, 2004, 70:021911.
- [7] Frank T D. Analytical results for fundamental time-delayed feedback systems subjected to multiplicative noise[J]. Phys. Rev. E, 2004, 69:061104.
- [8] Won-Ho Kye, Muhan Choi, Chil-Min Kim, et al. Encryption with synchronized time- delayed systems[J]. Phys. Rev. E, 2005,71:045202.
- [9] Lindner Benjamin, Doiron Brent, Longtin A. Theory of oscillatory firing induced by spatially correlated noise and delayed inhibitory feedback[J]. Phys. Rev. E, 2005,72: 061919.
- [10] Gerardo J Escalera Santos, Escalona J, Parmananda P. Regulating noise-induced spiking using feedback[J]. Phys. Rev. E, 2006, 73:042102.
- [11] 王忠龙,石亚非. 单模激光的噪声关联时间效应[J]. 中国激光, 2000(11):1019-1024.
- [12] 张莉,元秀华. 量子噪声和非线性色抽运噪声共同驱动下单模激光的锁相[J]. 中国激光, 2012(7):0702005(1-4).

(上接第4页)

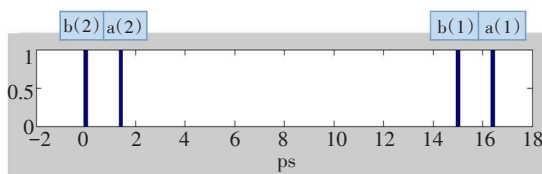


图9 图像出来的先后在坐标上的表示

3 结论

文中对线性啁啾技术与偏振技术相结合方案原理进行了分析,并且搭建了实际的平台,实现了四分幅方案,验证了波分分幅和偏振分幅的可能性,达到了空间分辨率为 60 lp/mm,波长分幅的时间分辨率低于 1.5 ps,偏振分幅的时间分辨为 15 ps。由于分幅数由滤波系统的数量决定,本次实验使用两个滤波系统,实现了四分幅,因此可以通过增加滤波系统来实现更多分幅,达到更高的时间分辨率。

参考文献

- [1] 黄翼翔,江少恩,李文洪,等. X光条纹相机时间性能标定[J]. 强激光与粒子束, 2006(5).
- [2] 袁永腾,郝轶聃,赵宗清,等. 空间电荷效应对X射线条纹相机动态范围影响的研究[J]. 物理学报, 2010(10).
- [3] 潘京生,亓鲁,肖洪亮,等. 微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析[J]. 物理学报, 2012(19).
- [4] Walden R H. Analog-to-digital converter survey and analysis[J]. IEEE J Sel Areas Comm, 1999, 17:539-550.
- [5] Kane DJ, Trebino R. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency resolved optical grating[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1993, 29:571-579.
- [6] Iaconis C, Walmsley IA. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. Opt. Lett, 1998, 23: 792-794.
- [7] Itatani J, Quéré F, Yudin G L. Attosecond streak camera [J]. Appl Phys Lett, 2002(88).
- [8] 林金谷,刘承惠,朱振和,等. 用非共线二次谐波法实现对锁模激光器超短脉冲宽度的测定[J]. 物理学报, 1980(3).
- [9] Kane D J, Trebino R. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency resolved optical grating[J]. IEEE J Quant Electron, 1993, 29:571-579.
- [10] Iaconis C, Walmsley I A. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. Opt Lett, 1998, 23:792-794.
- [11] 王超,田进寿,康轶凡,等. 时间分辨条纹相机技术的发展及相关研究展望[J]. 真空科学与技术学报, 2012(7).
- [12] Baker K L, Stewart R E. Solid-state framing camera with multiple time frames[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103.
- [13] 梁玲亮,田进寿,汪韬,等. 全光固体条纹相机的理论及其静态实验研究[J]. 物理学报, 2014(63).