

记录飞秒级超快动态过程的 脉冲数字全息技术*

王晓雷 王 毅 翟宏琛[†] 朱晓农 母国光

(南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2005 年 11 月 20 日收到, 2006 年 1 月 22 日收到修改稿)

采用脉冲数字全息技术实现对飞秒级超快动态过程的数字显微全息记录. 其中, 全息记录系统将单脉冲分割成具有飞秒至皮秒量级时间延迟的角度相同的物光子脉冲序列和具有同样时间延迟的角度不同的参考光子脉冲序列, 并以空间角分复用的方式在普通 CCD 的一帧图像上记录下包含多张子全息图的复合全息图, 然后通过数字傅里叶变换和数字滤波的方法, 分别再现出每张子全息图所记录的图像. 通过对飞秒激光激发空气电离过程的全息记录, 获得了具有飞秒时间分辨的等离子体形成和传播过程的动态图像.

关键词: 超短脉冲激光, 飞秒全息, 脉冲数字全息, 空间角分复用

PACC: 4230K, 4240M, 4280W

1. 引 言

超短脉冲全息技术是研究超快动态过程的有力工具. 它可以在脉冲的持续时间内, 以干涉条纹的形式把物场的超快动态信息迅速地记录并存储在记录材料上; 并可在再现时同时获得物波场的振幅和相位信息. 但它也对记录材料的灵敏性和响应速度提出了极高的要求.

CCD (charge couple device) 因其具有高敏感性和可实时观测等诸多优点, 已成为脉冲数字全息中不可取代的记录介质^[1-6]. 但在飞秒级超快脉冲全息技术中, 由于曝光频率往往会达到 10^{12} 幅/秒或更高, 因而目前 CCD 所能达到的技术尚不能使其帧频与之匹配. 为此, 只能利用角分复用^[7,8]、空间复用^[9,10]或波分复用等复用技术将超快动态过程中不同时刻的多张子全息图均记录在单帧 CCD 的图像上, 实现对该超快动态过程的连续记录, 然后再通过数字傅里叶变换和数字滤波, 分别再现出每张子全息图所记录的图像. Psaltis 实验小组设计了特殊的振荡腔以产生角度多重的脉冲序列, 实现了纳秒级的角分复用超快全息记录^[7]; 但是, 由于受该振荡腔结构的限制, 脉冲序列的时间间隔只能控制在纳秒

至皮秒量级, 并且其物光的视角无法保持不变.

本文报道一种新的可记录飞秒级超快过程的脉冲数字显微全息系统. 该系统采用多通道分立延迟的方法, 一方面可在保持物光角度不变的同时, 使参考光子脉冲具有不同的空间角度; 另一方面还能实现飞秒至皮秒量级的子脉冲序列的延迟时间. 本文利用该系统, 完成了对飞秒激光激发空气电离动态过程的全息记录, 并通过数字傅里叶变换和数字滤波技术再现出了多幅该过程的强度和相位图像, 获得了具有飞秒时间分辨的等离子体在空气中产生和传播的动态信息.

2. 超短脉冲数字显微全息系统

本文基于空间角分复用技术的超短脉冲数字全息系统如图 1 所示. 图中, 飞秒激光放大系统输出的单脉冲经二分之一波片及偏振分束器分为传播方向如图所示的激发光束 (图中之竖直光线) 和全息记录光束 (图中之水平光线) 两部分. 其中, 激发光束经延迟器 Delay_1 及聚焦透镜 L_1 后, 在其聚焦处引发待记录的空气电离事件. 延迟器 Delay_1 的作用是调节激发脉冲与记录光脉冲之间的时间间隔, 以保证被激发的空气电离过程能被记录光脉冲俘获. 全息记录

* 国家自然科学基金 (批准号: 60377008), 天津市自然科学基金 (批准号: 043800611) 和教育部支持重点项目资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhai@nankai.edu.cn

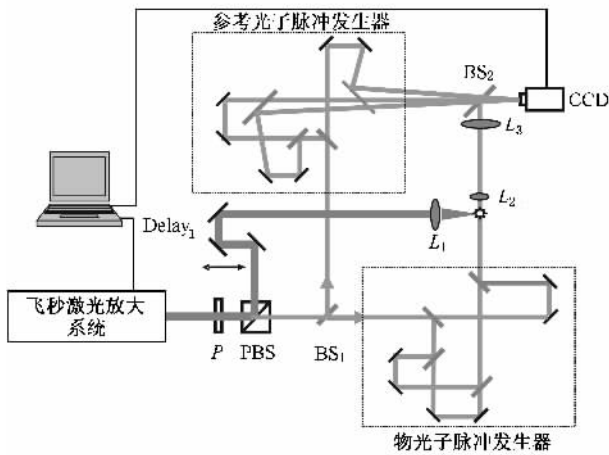


图1 应用空间角分复用技术的脉冲数字显微全息系统(P 为二分之一波片, PBS 为偏振分束器, BS 为非偏振分光板)

光束经非偏振分光板 BS_1 分束后,分别进入物光子脉冲发生器和参考光子脉冲发生器.由于两个子脉冲发生器均采用多通道分立的时间延迟的方法获得子脉冲序列,而通过调节平移台的位置可实现三通道的光程差由微米至厘米间的连续调节,因此相应的子脉冲时间间隔可实现从飞秒量级至皮秒量级间的连续调节,并且两个延迟量互不约束.通过适当的调节,可分别保证相应的物光子脉冲和参考光子脉冲同步产生,并经 BS_2 后在 CCD 的感光面上分别干

涉,从而在 CCD 的同一帧画面上形成三幅相互重叠的子脉冲全息图.由于两个发生器均可实现子脉冲出射角度的可调谐,因此可保证物光子脉冲以相同的角度对超快物场进行拍摄,并同时确保参考光子脉冲间的立体角度彼此不同,以实现应用空间角复用的全息记录.由于空间角分复用技术可使子全息图具有不同方向的光栅结构,因此更便于后期的数字滤波和再现^[11, 42].透镜 L_2 和 L_3 组成 $4f$ 系统,以便能在 CCD 感光面形成对微小的超快动态事件显微放大后的像面全息图.

3. 实验及结果

本文利用上述系统,完成了对飞秒激光激发空气电离动态过程的全息记录.实验中使用的掺钛蓝宝石飞秒激光放大系统购买于美国光谱物理公司,型号为 Spitfire HP 50,具体指标为中心波长 800 nm,最窄脉宽 35 fs(半峰全宽),最大单脉冲能量 2 mJ,重复频率 1 kHz.实验中 $4f$ 显微放大系统中的成像透镜 L_2 和 L_3 焦距依次为 1.5 cm 和 15 cm,由此可知,电离区域的放大倍数为 10.实验中使用的 CCD 为 MINTON1881EX,像素数及像素尺寸分别为 576×768 和 $10.8 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$.在实验中,飞秒激光放大系

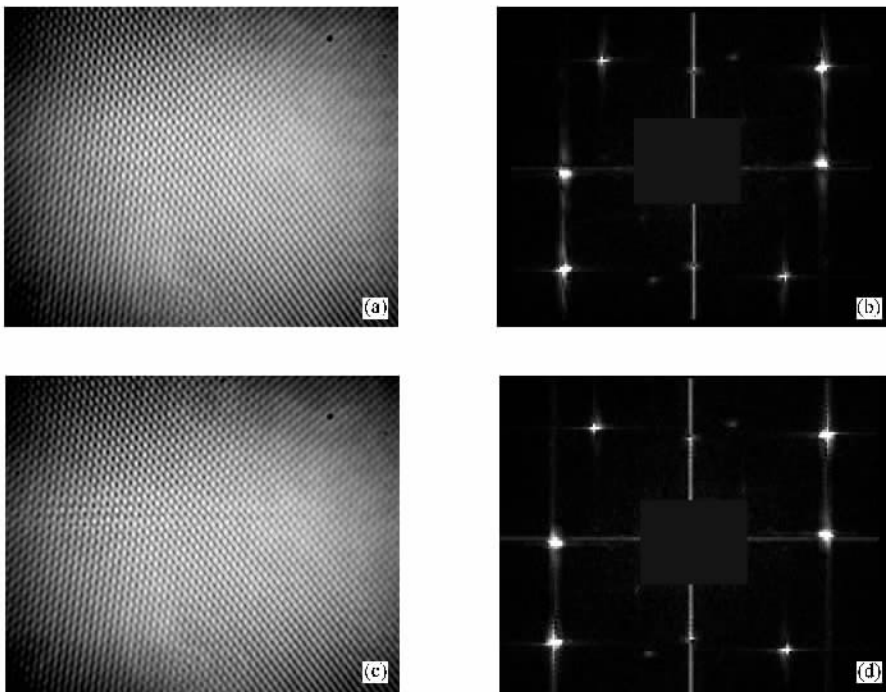


图2 脉冲数字全息图及傅里叶频谱分布 (a)(b)平面波的角分复用数字全息图及傅里叶频谱分布;(c)(d)空气电离的角分复用复合数字全息图及傅里叶频谱分布

统与 CCD 的采集卡同时由一台计算机控制,以便控制激光器的单脉冲输出时间与单帧 CCD 图像的存储时间匹配。

实验得到的角分复用复合数字全息图及滤掉直流项的傅里叶频谱分布示于图 2 中。由于采用了空间角分复用技术,从图 2(b)和(d)可见,三张子全息图的一级频谱在谱空间上已被清楚地分离。在此基础上,采用合适的滤波函数,可分别滤出三张子全息图的正一级或负一级频谱。再经过频谱平移、逆傅里叶变换,便可获得再现的波前 $U_i = A_i \exp(j\phi_i)$,其中 $i = 1, 2, 3$ 。由于全息图是被 $4f$ 成像系统记录的像面全息图,因此重构的 U_i 便是放大后的物波波前,它同时包含振幅和相位信息。

图 3 和图 4 分别为再现的空气等离子体的强度和相位差等高图像(相位差已被放大 100 倍),图像的拍摄间隔时间约为 400 fs 和 330 fs,其记录的空气电离事件是由单脉冲能量 0.4 mJ,脉宽 50 fs 的激光经焦距 5 cm 透镜聚焦激发而产生的。从再现的强度图像中可清楚地看到,随着时间的延续,等离子体阴

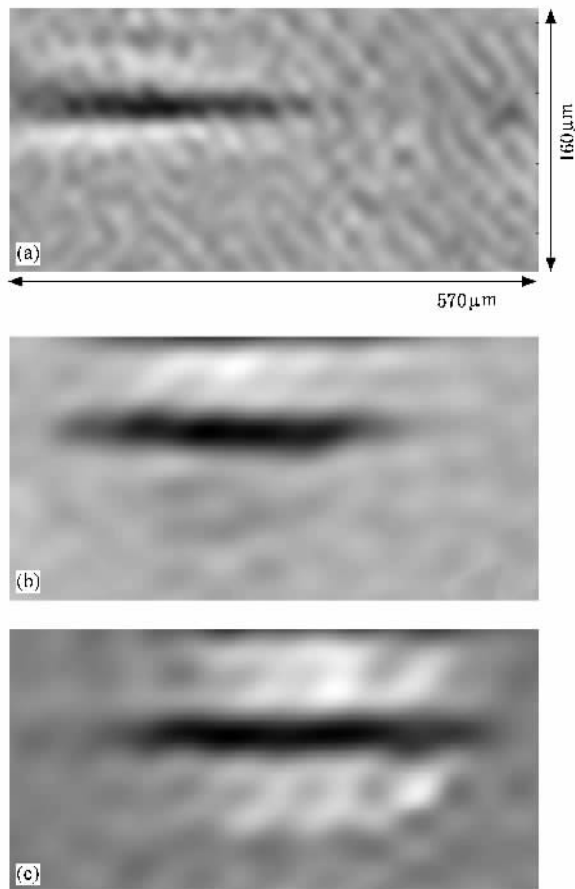


图 3 再现的空气等离子体强度图像(曝光时间 50 fs,拍摄时间 $t_a = 0, t_b = 400 \text{ fs}, t_c = 730 \text{ fs}$)

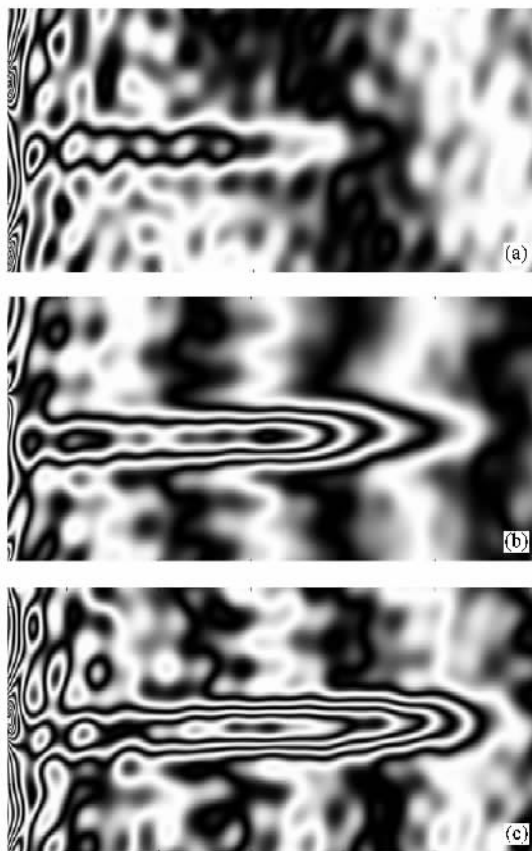


图 4 再现的空气等离子体相位差等高分布图像(曝光时间 50 fs,拍摄时间 $t_a = 0, t_b = 400 \text{ fs}, t_c = 730 \text{ fs}$)

影沿着激发光聚焦方向不断扩展,最终形成较长的等离子体通道。根据每张图片中等离子体的长度以及图片的时间间隔,可分别计算出此时等离子体的扩展速度:前两张的扩展速度约为 $2.75 \times 10^8 \text{ m/s}$,后两张的扩展速度约为 $2.1 \times 10^8 \text{ m/s}$,即随着时间的延续,等离子体扩展的速度减慢。从再现的相位差等高图中可看出等离子体内部相同电子数密度区域的空间分布和时间演化。随着时间的延续,相位差等高线不断变密,这说明等离子体内部从中心到外围自由电子密度变化的梯度在逐渐增加。

4. 结论和讨论

1. 本文首次提出了一种应用于脉冲数字全息记录的空间角分复用技术,并应用该技术在一帧 CCD 的图像上记录多幅飞秒量级超快动态过程的全息图。

2. 由于本系统采用了多通道分立延迟的方法产生全息记录脉冲序列,因此可通过调节平移台的

光程,实现子脉冲时间间隔从飞秒至皮秒量级间的连续调节,并通过分别调节物光子脉冲发生器和参考光子脉冲发生器中的反射镜和分光板的角度,在保证物光子脉冲序列具有相同的入射角度的同时,使参考光子脉冲序列的每个子脉冲具有不同的立体入射角,从而能获得同一拍摄角度下的不同时刻的动态再现像。

3. 本系统可利用 $4f$ 成像装置记录放大的像面全息图,从而可同时得到强度和相位的精确再现。

4. 本文应用该实验系统,得到了飞秒激光激发空气电离的动态过程的复合全息图及反映该过程的强度及相位分布变化的多幅数字再现图像,其单次曝光时间为 50 fs , 拍摄频率可达为 $3 \times 10^{12} \text{ fps}$ 。

5. 由于在物光子脉冲发生器和参考光子脉冲发生器中多次使用分光板,因而造成了一定的能量损失,尽管如此,由于实验中使用的飞秒激光放大系

统具有足够高的输出功率及 CCD 的高感光灵敏性,因此通过对记录光路进行适当的能量分配,能够确保曝光能量与 CCD 线性感光区的能量匹配。

6. 由于受实验中使用的飞秒激光脉冲自身时间相干性的限制(实验中测量得到的相干长度约为 $40 \mu\text{m}$, 相应的相干时间约为 140 fs), 因此子脉冲序列的时间间隔无法达到小于 140 fs 的数值. 这就决定了该系统的最大拍摄频率被限制在约小于 7×10^{12} 幅/秒的范围. 但如果选用具有更短脉冲宽度、更短时间相干性的激光光源, 则拍摄频率将能得到进一步的提高。

作者感谢南开大学光学所飞秒激光实验室的张铁群老师在实验仪器上给予的大力帮助! 感谢杨建军老师、赵友博博士、贾亚青博士、龚小亮博士、张楠博士在实验过程中给予的帮助。

-
- [1] Indebetouw G , Klysubun P 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 2017
- [2] Schedin S , Pedrini G , Tiziani H J , Aggarwal A K , Gusev M E 2001 *Appl. Opt.* **40** 100
- [3] Schedin S , Pedrini G , Tiziani H J , Santoyo F M 1999 *Appl. Opt.* **38** 7056
- [4] Pedrini G , Tiziani H J , Gusev M E 2000 *Appl. Opt.* **39** 246
- [5] Pedrini G , Fröning , Tiziani H J , Gusev M E 1999 *Appl. Opt.* **38** 3460
- [6] Pedrini G , Schedin S , Tiziani H J 2002 *Optics and Lasers in Engineering* **38** 117
- [7] Liu Z W , Centurion M , Panotopoulos G , Hong J , Psaltis D 2002 *Opt. Lett.* **27** 22
- [8] Liu Z W , Steckman Gregory J , Psaltis D 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 731
- [9] Tschudi T , Yamanaka C , Sasaki T , Yoshida K , Tanaka K 1978 *J. Phys. D* **11** 177
- [10] Centurion M , Pu Y , Liu Z W *et al* 2004 *Opt. Lett.* **29** 772
- [11] Wang X L , Zhai H C , Wang Y , Mu G G 2005 *Acta Photonica Sinica* **34** 55(in Chinese) [王晓雷、翟宏琛、王 毅、母国光 2005 光子学报 **34** 55]
- [12] Wang X L , Zhai H C , Wang Y , Mu G G 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1137 (in Chinese) [王晓雷、翟宏琛、王 毅、母国光 2006 物理学报 **55** 1137]

Pulsed digital holographic recording of ultra-fast process of the femto-second order^{*}

Wang Xiao-Lei Wang Yi Zhai Hong-Chen Zhu Xiao-Nong Mu Guo-Guang

(*Institute of Modern Optics , Nankai University , Key Laboratory of Optoelectronic Information Science & Technology , Ministry of Education , Tianjin 300071 , China*)

(Received 20 November 2005 ; revised manuscript received 22 January 2006)

Abstract

In this paper , we report a pulsed digital micro-holography system for recording ultra-fast process of the order of femto-second . Two sub-pulse-train generators can be adjusted independently for generating reference beams with different spatial angles and object beams of the same angle , respectively , and the time delay between the sub-pulses can be adjusted from pico-seconds to femto-seconds . In the experiment , the ultra-fast dynamic process of air ionization induced by a femto-second laser pulse is recorded by the holographic recording system through spatially angular multiplexing , and both of the digitally reconstructed images in intensity and phase are obtained , which show the dynamic process of formation and propagation of the plasma with a time resolution of the order of femto-second .

Keywords : ultra-short laser pulses , fs holography , pulsed digital holography , spatially angular multiplexing

PACC : 4230K , 4240M , 4280W

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60377008) , the Natural Science Foundation of Tianjin (Grant No. 043800611) and the Foundation for Key Program of Ministry of Education , China .