

文章编号: 0253-2239(2006)11-1632-4

应用波分复用技术实现飞秒级超快动态过程的 脉冲数字显微全息记录*

王晓雷¹ 王毅¹ 翟宏琛¹ 朱晓农¹ 母国光¹ 吴兰²

(¹ 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)
(² 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 采用波分复用方法实现飞秒级超快动态过程的脉冲数字显微全息记录和再现。在全息记录过程中, 利用 BBO 倍频晶体对入射激光进行倍频, 将基波和谐波分光, 并经时间延迟后进入迈克耳孙干涉仪, 从而可应用波分复用技术, 先后在 CCD 的一帧图像上记录两张具有不同空间频率的子全息图。采用这种方法, 实现了对单脉冲飞秒激光激发空气电离的超快动态过程的全息记录, 并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记录的波前, 从而获得了具有飞秒时间分辨的空气等离子体形成和传播过程的动态振幅和相位图像, 其单次曝光时间为 50 fs, 曝光时间间隔为 400 fs, 相应的曝光频率约为 2.5×10^{12} f/s。

关键词: 全息; 飞秒超快过程; 超短脉冲激光; 飞秒全息; 波分复用; 等离子体

中图分类号: TB872; TB877.1 文献标识码: A

Pulsed Digital Micro-Holography for Femtosecond Order Ultrafast Process Recording by Using Wavelength Division Multiplexing Technology

Wang Xiaolei¹ Wang Yi¹ Zhai Hongchen¹ Zhu Xiaonong¹ Mu Guoguang¹ Wu Lan²

(¹ Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)
(² State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Wavelength division multiplexing (WDM) used in an ultrashort pulsed digital micro-holographic system to record and represent ultrafast processing of femtosecond scale is reported. A BBO crystal is used to generate the harmonic wave of the incident laser wave, and both the basic and doubled frequency waves are separated, then time-delayed respectively and introduced to a Michelson's interferometer to record two sub-holograms with different spatial frequencies on a single frame of a CCD by means of WDM. In the experiment, an ultrafast dynamic process of air ionization induced by a single femtosecond laser pulse is holographically recorded, and both intensity and phase images of the digitally reconstructed images are obtained through Fourier transformation and digital filtering, which show clearly the dynamic process of the plasma forming and propagating, with a time resolution of femtosecond scale. The related parameters are, exposure time 50 fs, exposure interval of 400 fs, as well as exposure frequency of 2.5×10^{12} f/s.

Key words: holography; femtosecond ultrafast process; ultrashort pulse laser; wavelength division multiplexing (WDM); plasma

* 国家自然科学基金(60377008)、天津市自然科学基金(043800611)和浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题(LMOI-0503)资助课题。

作者简介: 王晓雷(1980~), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事数字全息、飞秒全息、激光等离子体的研究。

E-mail: wangxiaolei@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 翟宏琛(1944~), 男, 天津人, 南开大学现代光学研究所研究员, 博士生导师, 主要从事数字全息、光电图像处理的研究。E-mail: zhai@nankai.edu.cn

收稿日期: 2005-11-16; 收到修改稿日期: 2006-03-23

1 引言

超快脉冲全息技术是研究快速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,并可同时获得振幅和相位信息。但该技术对记录材料的灵敏性和响应速度的要求较高。CCD 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一种不可取代的记录工具^[1~6]。但在对超快动态过程进行记录的脉冲数字全息记录过程中,由于曝光频率会远远高于 CCD 的帧频,因此只能采用角分复用^[7~9]、空间复用^[10,11]等复用技术将不同时刻的多张全息图记录在 CCD 的单帧图像上,然后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波前。

文献[7]所报道的角分复用数字全息系统,只适用于记录皮秒-纳秒时间量级的超快动态事件。文献[11]所报道的空间复用数字全息系统,由于在小尺度的 CCD 感光面上记录下彼此不重叠的多幅子全息图,增加了实验的难度,并且对物体的拍摄视角无法保持不变。

本文报道一种基于波分复用技术的超短脉冲数

字显微全息系统。利用该系统,实现了对单脉冲飞秒激光激发空气电离动态过程的超快全息记录,并通过数字傅里叶变换和数字滤波技术,分别再现出了子全息图对应的等离子体在空气中产生和传播的动态振幅和相位图像。

2 原理

波分复用技术在脉冲数字全息中的应用原理就是在物光和参考光角度不变的情况下,通过改变物光和参考光的波长,先后在同一帧数字图像上纪录多张具有不同光栅频率的子全息图,并在数字再现时,根据这些子全息图在频率空间的可分离性,将其分别提取及再现。

假设 CCD 感光面为 xy 平面,物光子脉冲和参考光子脉冲可分别表达为 $O_i = A_i \exp(j\phi_i)$ 和 $R_i = R_0 \exp[j2\pi(x \cos \alpha / \lambda_i + y \cos \beta / \lambda_i)]$,其中 α 和 β 分别为参考光子脉冲的入射方向与 x 轴和 y 轴的夹角, $i=1,2,\dots,n$, n 为子全息图个数。为简单起见,假设仅记录两张子全息图,即 $n=2$,那么根据全息理论,复合全息图的强度可表示为

$$I = I_1 + I_2 = |O_1|^2 + |O_2|^2 + 2R_0^2 + O_1 \exp[-j2\pi(x \cos \alpha / \lambda_1 + y \cos \beta / \lambda_1)] + O_1^* \exp[j2\pi(x \cos \alpha / \lambda_1 + y \cos \beta / \lambda_1)] + O_2 \exp[j2\pi(x \cos \alpha / \lambda_2 + y \cos \beta / \lambda_2)] + O_2^* \exp[j2\pi(x \cos \alpha / \lambda_2 + y \cos \beta / \lambda_2)], \quad (1)$$

对(1)式做傅里叶变换可得

$$\mathcal{F}(I) = U_0(f_x, f_y) + U_1(f_x + \cos \alpha / \lambda_1, f_y + \cos \beta / \lambda_1) + U_1^*[-(f_x + \cos \alpha / \lambda_1), -(f_y + \cos \beta / \lambda_1)] + U_2(f_x + \cos \alpha / \lambda_2, f_y + \cos \beta / \lambda_2) + U_2^*[-(f_x + \cos \alpha / \lambda_2), -(f_y + \cos \beta / \lambda_2)], \quad (2)$$

其中, $U_0(f_x, f_y) = \mathcal{F}(|O_1|^2 + |O_2|^2 + 2R_0^2)$ 为直流项,它位于频谱面的中心。(2)式的后四项,分别对应于(1)式中后四项的傅里叶变换。如果物波频谱是限带函数,那么当选择合适的 λ_1 和 λ_2 时,(2)式中的后四项在频谱面上是分离的,因此可滤出 $U_1(f_x + \cos \alpha / \lambda_1, f_y + \cos \beta / \lambda_1)$ 和 $U_2(f_x + \cos \alpha / \lambda_2, f_y + \cos \beta / \lambda_2)$,再经频谱平移、逆傅里叶变换可得

$$\mathcal{F}^{-1}\{U_1[(f_x + \cos \alpha / \lambda_1) - \cos \alpha / \lambda_1, (f_y + \cos \beta / \lambda_1) - \cos \beta / \lambda_1]\} = O_1 = A_1 \exp(j\phi),$$

和

$$\mathcal{F}^{-1}\{U_2[(f_x + \cos \alpha / \lambda_2) - \cos \alpha / \lambda_2, (f_y + \cos \beta / \lambda_2) - \cos \beta / \lambda_2]\} = O_2 = A_2 \exp(j\phi),$$

由此可见,复合全息图中包含的两张子全息图所记录的波前被分别重现。

图 1 为实验装置示意图。飞秒激光放大系统输出的单脉冲激光经半波片 P_1 及偏振分束器(PBS)分为互相垂直的激发光束(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,激发脉冲光束经反射镜 M_1 及聚焦透镜 L_1 后,在其聚焦处引发待记录的超快过程。全息记录光束经过半波片 P_2 和倍频晶体 BBO 后,其成分包含了二次倍频后的谐波和基波; P_2 的作用是调整入射激光的偏振

态,使 BBO 晶体产生合适的倍频效率。谐波脉冲和基波脉冲被二向色镜 DM_1 (对谐波具有高的透射率,对基波具有高的反射率)在空间上分开,分别进入各自的延迟光路,使两组具有不同波长的脉冲具有飞秒至皮秒量级的可调节的时间延迟。此后基波和谐波经二向色镜 DM_2 (对基波具有高的透射率,对谐波具有高的反射率)变为传播方向相同的两束光,再经反射镜 M_2 ,先后进入迈克耳孙干涉仪,分别在 CCD 的感光面上干涉,形成两幅脉冲子全息图,并被记录在同一帧 CCD 的画面上。透镜 L_2 和 L_3 组成 $4f$ 系统,以便能在 CCD 感光面上形成微小的超快动态过程的显微放大像面全息图。

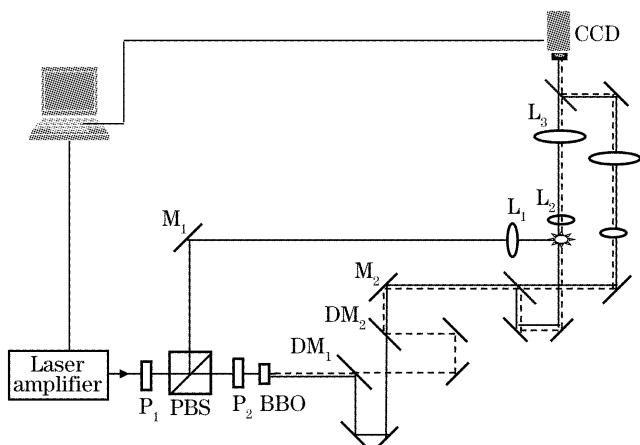


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

3 实验及结果

利用上述基于波分复用技术的脉冲数字全息系统,实现了对单脉冲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是美国光谱物理公司的,型号为 Spitfire HP 50,具体指标为:中心波长 800 nm,最窄脉宽为 50 fs(半峰全宽),最大单脉冲能量 2 mJ,重复频率 1 kHz。BBO 晶体尺寸为 10 mm×10 mm×2 mm,最大倍频效率约为 30%。 $4f$ 显微放大系统中的成像透镜 L_2 和 L_3 焦距分别为 1.5 cm 和 15 cm。因此可对电离区域进行放大倍数为 10 的成像。使用的 CCD 型号为 MINTON 1881 EX,像素数及像素尺寸分别为 576×768 和 10.8 μm ×10 μm 。该飞秒激光放大系统与 CCD 的采集卡同时由一台计算机进行控制,以便控制激光器的单脉冲的输出与单帧 CCD 图像记录之间的时间匹配。

在实验中,脉冲能量为 0.44 mJ、脉宽为 50 fs 的单脉冲激光经焦距 5 cm 的透镜聚焦后激发待记

录的空气电离动态过程。实验获得的波分复用复合数字全息图如图 2 所示,它包含的两张子全息图的拍摄间隔时间约为 400 fs。复合全息图的傅里叶频谱经滤掉零级后如图 3 所示,可见,两张子全息图的频谱已经清楚地分离了。在此基础上,采用合适的滤波函数,可分别滤出两张子全息图的正一级或负一级频谱。再经过频谱平移、逆傅里叶变换后,便可获得再现的波前: $O_i = A_i \exp(j\phi_i)$, 其中 $i=1,2$ 。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 O_i 便是放大后的物波波前,它同时包含振幅和相位信息。

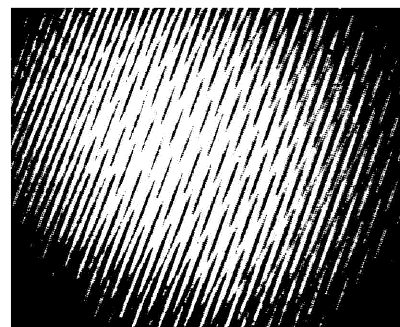


图 2 波分复用复合全息图

Fig. 2 Compound hologram of wave length division multiplexing

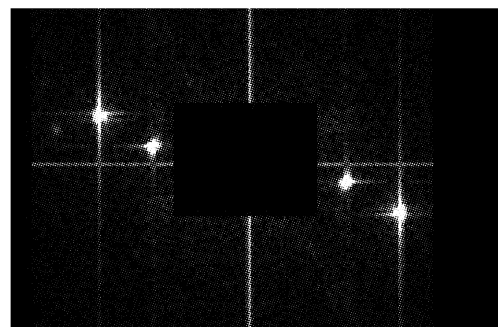


图 3 图 2 的傅里叶频谱分布

Fig. 3 Fourier frequency spectra of Fig. 2

图 4(a)和图 4(b)为再现的空气等离子体的强度信息,单次曝光时间为 50 fs,根据两张图像中等离子体阴影前端的位置,可测量出阴影沿激发光聚焦方向的扩展长度,约为 127 μm ,再根据两张图像的时间间隔 400 fs,由此可估算出阴影的扩展速度约为 3.2×10^8 m/s,这和光波在真空中的传播速度接近。图 4(c)和图 4(d)为再现的相位差等高分布图,其中,为了增加显示分辨率,采用相位倍增方法^[12]使相位差放大了 10 倍。再现的相位差等高图反映了不同时刻的等离子体内部相同电子数密度区域的空间分布。

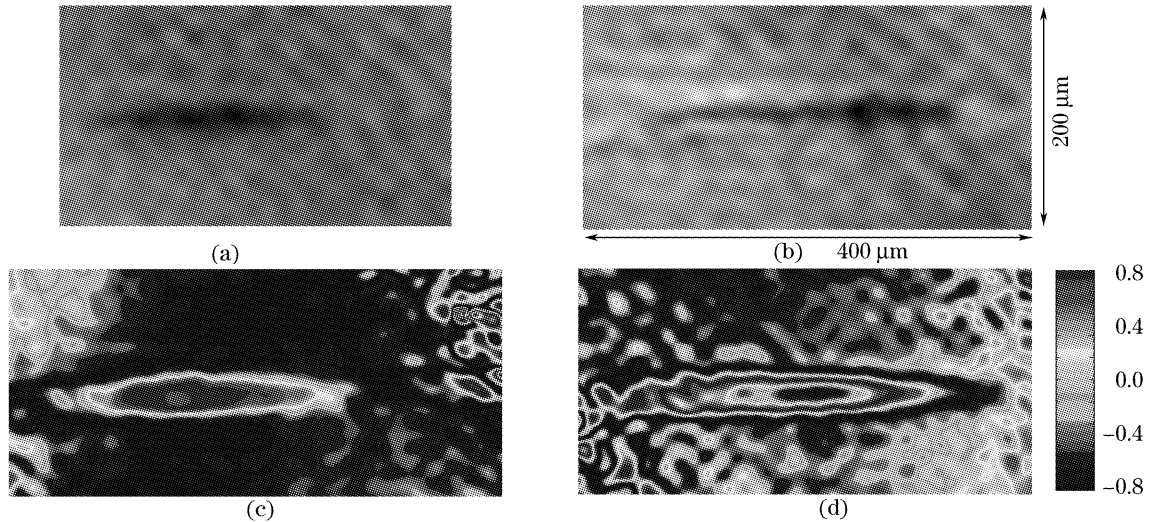


图 4 再现的空气等离子体的强度和相位差图像。(a),(b)强度分布,(c),(d)相位差的等高分布

Fig. 4 Reconstructed intensity and phase images of the air plasma. (a),(b) intensity images, (c),(d) phase images

4 结 论

设计并建立了波分复用脉冲数字全息系统,该系统可在同一帧 CCD 的图像上记录多幅飞秒量级超快动态过程的全息图;在再现时,利用数字傅里叶变换以及数字滤波的方法,分别再现出子全息图所记录的物波波前。利用该系统,完成了对单脉冲飞秒激光激发空气电离的动态过程的全息记录,并再现获得了具有飞秒时间分辨的空气等离子体形成和传播过程的强度及相位动态分布图像,其单次曝光时间为 50 fs,曝光间隔时间约为 400 fs,相应的曝光频率约为 2.5×10^{12} f/s。由于实验条件的限制,本文仅采用一次倍频实现了两个波长的波分复用记录,作为原理性的演示;只要具有足够的激光输出能量及多次变频的实验条件,采用本文的方法,可记录更多的高时间分辨力的子全息图。

致谢 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;并对杨建军老师、赵友博博士、贾亚青博士、龚小竞博士、张楠博士在实验过程中给予的帮助表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Indebetouw G, Klysubun P. Space-time digital holography: A three-dimensional microscopic imaging scheme with an arbitrary degree of spatial coherence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(14): 2017~2019
- 2 Schedin S, Pedrini G, Tiziani H J *et al.*. Highly sensitive pulsed digital holography for built-in defect analysis with a laser

- excitation[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(1): 100~103
- 3 Schedin S, Pedrini G, Tiziani H J *et al.*. Simultaneous three-dimensional dynamic deformation measurements with pulsed digital holography[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34): 7056~7062
- 4 Pedrini G, Tiziani H J, Gusev M E. Pulsed digital holographic interferometry with 694 and 347 nm wavelengths[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(2): 246~249
- 5 Pedrini G, Fröning P, Tiziani H J *et al.*. Pulsed digital holography for high-speed contouring that uses a two-wavelength method[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3460~3467
- 6 Pedrini G, Schedin S, Tiziani H J. Pulsed digital holography combined with vibrometry for 3D measurements of vibrating objects[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **38**(3~4): 117~129
- 7 Liu Zhiwen, Centurion Martin, Panotopoulos George *et al.*. Holographic recording of fast events on a CCD camera[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(1): 22~24
- 8 Wang Xiaolei, Zhai Hongchen, Wang Yi *et al.*. Pulsed digital holography for ultra-fast recording[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(Z1): 55~57 (in Chinese)
- 王晓雷,翟宏琛,王毅等. 应用脉冲数字全息术记录超快过程[J]. *光子学报*, 2005, **34**(Z1): 55~57
- 9 Wang Xiaolei, Zhai Hongchen, Wang Yi *et al.*. Spatially angular multiplexing in ultra-short pulsed digital holography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3): 1137~1142 (in Chinese)
- 王晓雷,翟宏琛,王毅等. 超短脉冲数字全息术中的立体角分复用技术[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3): 1137~1142
- 10 Schudi T, Yamanaka C, Sasaki T *et al.*. A study of high-power laser effects in dielectrics using multiframe picosecond holography [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1978, **11**: 177~180
- 11 Centurion Martin, Pu Ye, Liu Zhiwen *et al.*. Holographic recording of laser-induced plasma[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7): 772~774
- 12 Zhao Jianlin, Tan Haiyun. Measuring three-dimensional temperature field by digital holographic interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1447~1451 (in Chinese)
- 赵建林,谭海蕴. 电子学全息干涉术用于温度场测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1447~1451