

文章编号:1004-9037(2014)06-0895-06

## 超快平面显微成像技术

陈宏伟 邢芳俭 王雨西 雷 诚 陈明华 谢世钟

(清华大学电子工程系,北京,100084)

**摘要:**快速成像技术在很多领域都有着重要的应用,本文基于超短光脉冲的时-空-频映射原理,提出并实现了一种超快平面显微成像技术。利用色散傅里叶变换及空间色散器件把光脉冲的宽带频谱信息分别映射到时域和空域,利用高速光电探测器进行串行单像素成像,最终获得了帧速率为 20.9 MHz,空间分辨率为 22  $\mu\text{m}$  和 55  $\mu\text{m}$  的一维及二维平面成像系统。在实验中用标准的分辨率目标板验证了成像效果。该技术为超快成像提供了一种有效手段,并将应用于高速平面检测等多个领域。

**关键词:**单像素成像;色散傅里叶变换;时-空-频映射;显微成像

中图分类号:TN29

文献标志码:A

## Ultra-fast Surface Microscopic Imaging Technique

Chen Hongwei, Xing Fangjian, Wang Yuxi, Lei Cheng, Chen Minghua, Xie Shizhong

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

**Abstract:** Fast imaging techniques have important applications in many fields. An ultra-fast surface microscopic imaging technique is proposed and demonstrated. This technique is based on the time-space-frequency mapping of ultrashort optical pulses. Based on dispersive Fourier transform and spatial dispersion devices, the optical spectrum is mapping on time and space domain separately. The image is reconstructed after a high speed serial single-pixel photo detector. A one and two-dimensional imaging system with the frame rate of 20.9 MHz, 22  $\mu\text{m}$  and 55  $\mu\text{m}$  spatial resolution is realized. Imaging experiments with standard resolution targets are successfully demonstrated. This technique is an effective method for ultrafast imaging and can be used for high speed surface inspection.

**Key words:** single-pixel imaging; dispersive Fourier transform; time-space-frequency mapping; microscopic imaging

## 引 言

超快成像是现代光学成像的主要发展方向之一。受到传统电荷耦合元件(Charge-coupled device, CCD)和互补氧化物半导体(Complementary metal oxide semiconductor, CMOS)传感器等成像元件的固有属性限制,其用于成像的速度有限,一般为几千帧每秒的量级<sup>[1]</sup>。然而在自然界中,存在着很多超快瞬态现象,比如像水滴低落过程、肥

皂泡破裂的瞬间等。在人类和自然生活中,也有着许多超快瞬态过程,比如子弹击穿水果,生物细胞的衍变,还有化学反应过程等。比较典型的一个应用是,在人体大量的红细胞中存在着极个别的突变细胞,譬如像循环流动肿瘤细胞。这样的肿瘤细胞可能会引发癌症<sup>[2]</sup>。然而 1 mL 的血液中,这样的肿瘤细胞大概只有一个或者几个。而 1 mL 血液却有大约 50 亿个细胞。利用现在最快速的相机进行拍摄识别,大约每秒拍摄 1 000 个,识别这样一个循环流动肿瘤细胞需要 2 个月时间。另外在

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2012CB315703)资助项目;国家自然科学基金(61322113)资助项目;国家重点实验室开放基金课题(14K10ESPCT)资助项目;国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室开放基金(SCAPC201407)资助项目。

**收稿日期:**2014-07-25;**修订日期:**2014-10-10

通信系统中,也存在着许多瞬态无序过程,比如自发辐射噪声。对于所有的这些超快、瞬态、海量信息的快速实时获取,目前由于缺乏更为快速的信息获取手段,人类无法对所有的这些超快现象获得更为详细的认识。对于传统的电子成像传感器,其在高成像帧率下,每一帧中将有更少的光子数被探测到。同时随着这种带宽的增加,光电探测的热噪声亦会增加,从而对于这种弱信号,探测灵敏度将大大受限<sup>[3-4]</sup>。因此,在探测灵敏度和帧速率之间存在着一种基本的矛盾。

鉴于以上的应用需求背景和当前的成像技术限制,迫切地需要寻找新型超快速成像技术。最近,一种基于超短脉冲空-时-频映射原理的超快实时显微成像技术被提出<sup>[5-6]</sup>。其基本原理是将一个超短宽谱锁模脉冲激光器的光谱利用空间色散元件一一映射至空间域,然后再利用时间色散器件将光谱一一映射至时间域,最后利用高速实时示波器进行采集并恢复图像信息。需要指出的是该技术的成像帧率等同于脉冲源的重复率。在此基础上,利用原理简单并且易于实现的通信波段(1 550 nm)被动锁模激光器和预啁啾技术实现了超高速的一维线扫描成像以及二维瞬时显微成像系统。

## 1 基本原理及实验

本文中提出的超快成像技术主要是利用光学空间色散和时域拉伸技术来实现。基本原理如图 1 所示,从光源输出的是宽光谱高重复频率窄脉冲光,光脉冲在时间上是极短的,在频域上是一个较宽的频带。这样的脉冲经过时-频映射,就可以把脉冲的频谱映射到时域上。有理论证明,经过足够大的光色散器件,就可以实现光脉冲频谱到时域的映射,这被称为色散傅里叶变换<sup>[7]</sup>。这时光脉冲在时域和频域上都是具有宽谱覆盖的脉冲,但是在空间上还只是一个点光源。然后光脉冲再经过空-频映射<sup>[8]</sup>,即光谱的频率信息在空间上散开,通常可以利用散射光栅来实现。至此,光脉冲的宽广频谱信息就同时在频率、时间和空间上散开,构成了一种“彩虹”分布的光斑。这个光斑照射到成像目标上,目标的信息被承载在时域和频域,并且时域和频域所承载的信息是一一对应的,这样就可以通过一个高速的单像素光电转换器件把这些信息串行的接收下来,并且进行分析处理,重构出原始图像来。这个方法与普通成像技术的区别在于克服了传统成像传感器(比如 CCD 和 CMOS)的成像速

度限制,把并行图像转换成了高速串行图像,并且利用光通信当中使用的成熟高速的光电探测器进行接收。同时,利用光脉冲进行成像快门的控制,避免了慢速的机械快门,从而大大提高了成像速度,成像的速率与光脉冲的重复频率相同。光脉冲的重复频率通常为 MHz 到 GHz 范围之间,因此该技术实现的成像帧率也在每秒  $10^6$  帧到  $10^9$  帧之间,比传统成像设备快了 3 到 6 个数量级以上。

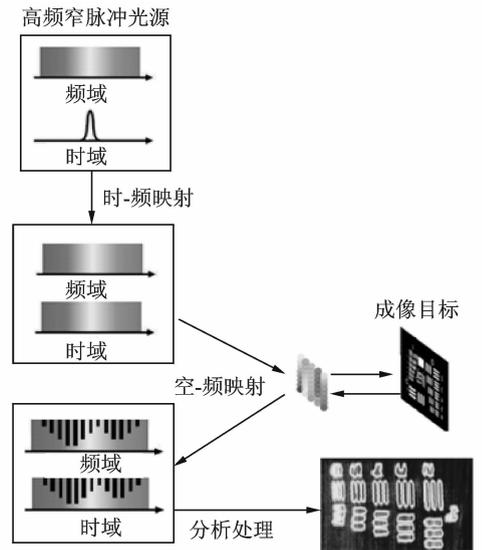


图 1 超快成像技术原理

Fig. 1 Principle of ultra-fast imaging technique

### 1.1 超快一维扫描成像

利用上面所描述的时-空-频映射超快成像原理,搭建了成像实验平台,如图 2 所示。实验中所用脉冲光源为实验室自制的被动锁模激光器,该脉冲源的中心波长为 1 560 nm, 10 dB 带宽为 12 nm,脉冲重复率为 20.9 MHz,其变换极限下的脉冲宽度为 600 fs。该脉冲光经过总色散约为  $-2\ 700$  ps/nm 的色散光纤,再经过掺铒光纤放大器放大后通过环形器和光纤准直器进入到空间光路中,光斑大小约为 2 mm,两个波片(一个为  $1/2$  波长,一个为  $1/4$  波长)用来调整入射光束的偏振态,以使得在散射光栅处得到最佳的散射效率。这样,通过散射光栅后,原始光斑就被散射成一维的彩虹光斑,即不同波长在空间位置上形成一维分布。此时如果在垂直光斑方向上增加一个虚拟相位阵列光栅(Virtually-imaged phased array, VIPA)<sup>[9]</sup>,那么光斑将在垂直方向上被进一步散射,形成二维彩虹光斑。在实验中,如果想要获得一维扫描图像,则不需要 VIPA,反之,如果要获得二维扫描图像,则需要 VIPA。此处利用的散射光栅的

刻线数为 1 200 线/mL。如果不使用 VIPA,那么经过光栅后的光斑将经过显微物镜聚焦到成像目标板上,目标板上的信息将映射到光斑上,即光频谱上。反射光从原光路返回,经过环形器后进入高速光电探测器(带宽为 10 GHz)和数字采样示波器(Tektronix 72004B,采样率 50 GS/s)进行信息采集,并且根据所获得的信息重构图像。为获得目标板上的平面信息,该目标表被放置在一个电控平移台上,以 10  $\mu\text{m}$  的步进长度进行移动。实验中所使用的目标板是标准分辨率模板 USAF-1951。

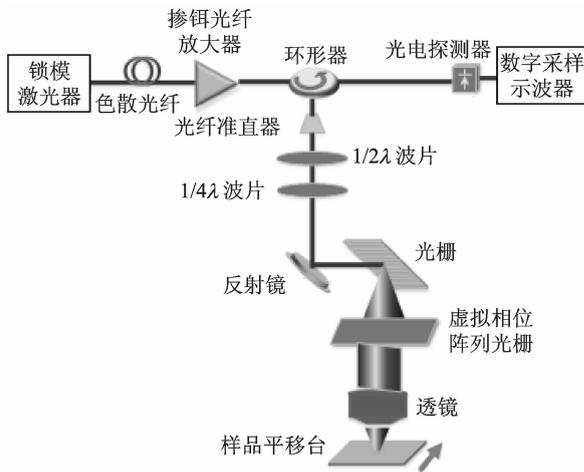


图 2 实验系统

Fig. 2 Experimental setup

首先实验验证了其时频变换的可行性,如图 3 所示。下方的线表示的是脉冲光谱信息,上方的线表示的是脉冲色散后的时域信息。通过对两组图形的对比,可以看出光谱信息与色散后的脉冲时域信息是一一对应的,这样就实现了脉冲光谱域向时

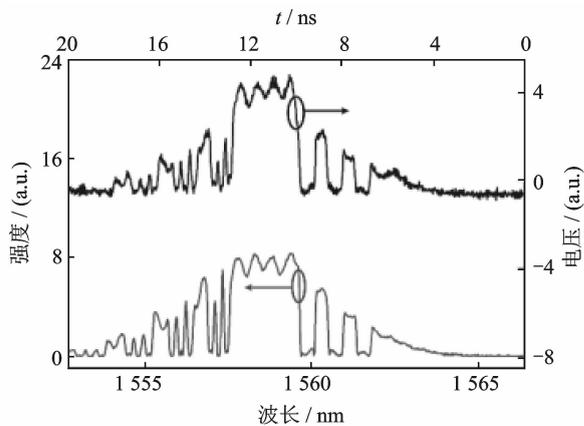


图 3 在单次测量中,脉冲的光谱信息(下方)与色散后的时域信息(上方)的图形对比

Fig. 3 In single measurement, comparison of optical pulse spectrum and time profile after dispersion

域信息的映射。进一步,对分辨率目标板进行了成像实验验证,通过在垂直方向上平移目标板获得了如图 4 所示的实验结果。

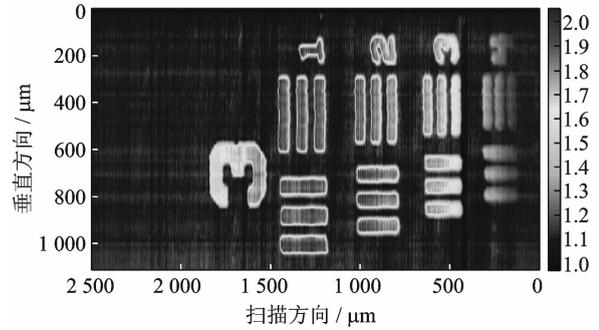
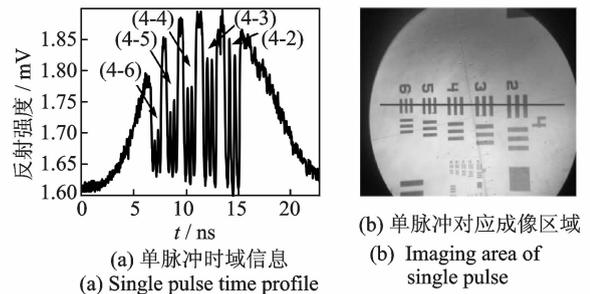


图 4 USAF-1951 第 3 群组二维重构图

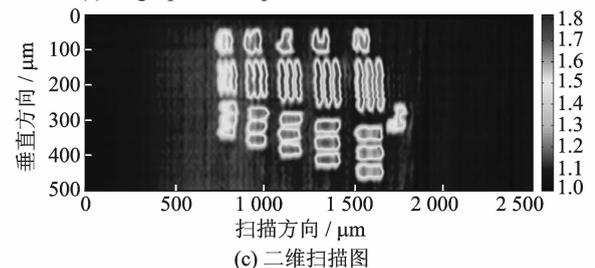
Fig. 4 2-D Reconstructed figure of USAF-1951 group 3

这里线扫描的横向视场为 2.5 mm,第 3 群组的线对尺寸是 3-1:63  $\mu\text{m}$ , 3-2:56  $\mu\text{m}$ , 3-3:50  $\mu\text{m}$ , 3-4:44  $\mu\text{m}$ 。为了进一步确定实验系统的最终分辨率限制,对目标板的第 4 群组进行了实验测试,如图 5 所示。图 5(a)所示是对图 5(b)长横线处探测的一个单脉冲时域信息。



(a) 单脉冲时域信息

(b) Imaging area of single pulse



(c) 2-D reconstructed scanning figure

图 5 USAF-1951 第四群组二维重构图

Fig. 5 2-D Reconstructed figure of USAF-1951 group 4

通过对该组时域信号的采集观察,在 4-6 和 4-5 处其时域信息已经明显模糊,由此可判断该成像系统的最终空间分辨率极限约为 22  $\mu\text{m}$ 。

需要指出的是,该系统的成像分辨率受限于 3 个因素<sup>[10]</sup>。首先是空间光学衍射系统的分辨率限

制。在空间链路中,光谱经光栅衍射在空间上散开,并通过透镜聚焦至样本。该过程受到光栅的光谱分辨率限制,表达式如下

$$\delta\lambda = \lambda/mN \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为中心波长, $m$ 为衍射级次, $N$ 为光斑占有的刻槽线数。系统在空-频映射中,对于确定的入射光斑尺寸和一定带宽光谱,光栅衍射确定了系统分辨率点数。

第 2 个因素为时频映射中的光谱分辨率限制。在色散光纤链路中,映射有样品信息的时域脉冲在光纤的色散下进行展开,其谱域信息在时域上展开获取,该过程受到色散光纤的光谱分辨率限制,其表达式如下

$$\delta\lambda = \lambda\sqrt{2}/DC \quad (2)$$

式中: $D$ 为色散值, $C$ 为真空光速。由式(2)可见,色散越大,波长分辨率越小。

第 3 个因素是探测系统一定带宽下的时间分辨率限制。对于一个确定带宽的探测系统(包括光电探测器和实时示波器),系统所确定的光谱分辨率表达式为

$$\delta\lambda = 0.35/D \times f_{\text{det}} \quad (3)$$

其中  $f_{\text{det}}$  为探测系统的带宽。

实验中所利用的总色散为约  $-2\,700$  ps/nm,由此可见系统的最终分辨率受限于空间衍射极限,其值约为  $22\ \mu\text{m}$ ,与实验结果相吻合。

## 1.2 超快二维成像

在实现一维快速成像的基础上,进一步的使用 VIPA 实现  $y$  方向上的空间色散,得到二维彩虹光斑,这样就使得无需移动扫描目标板,可以实现二维成像。其中的关键器件 VIPA,它的基本结构是由一个腔及前后表面构成,如图 6 所示。VIPA 腔通常为玻璃板。其前表面的上镀有一层全反射膜,只有最下方一小块区域未镀膜(或镀有增透膜)以作为光线入射的窗口,成为 VIPA 入射窗;后表面上全部镀有  $95\% \sim 98\%$  的高反膜。由于在使用 VIPA 时通常需要一个柱透镜来将输入光汇聚,因此有时也将此柱透镜视作 VIPA 的一部分。VIPA 在原理上与光栅有类似之处,它也是利用相干叠加实现空间色散的。

类似于光栅方程,VIPA 的方程为

$$2n \cdot t \cdot \cos\theta_{\text{out}} = m \cdot \lambda \quad (4)$$

式中: $n$ 为 VIPA 腔材料的折射率, $t$ 为 VIPA 板厚度, $2n \cdot t \cdot \cos\theta_{\text{out}}$ 即是相邻两出射光的光程差, $m$ 取任意整数,成为 VIPA 衍射的级次。根据式(4),

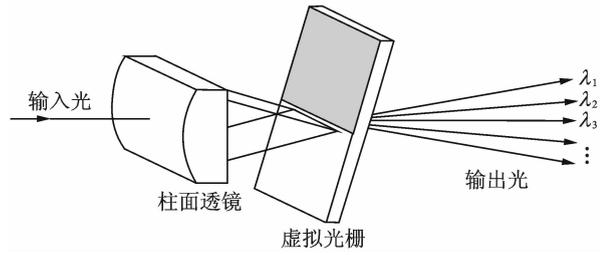


图 6 VIPA 结构示意图

Fig. 6 Structure of VIPA

当 VIPA 板的材料、厚度确定后,出射角  $\theta_{\text{out}}$ ,将决定于波长  $\lambda$ 。不同波长的分量会以不同角度出射。

实验中涉及的参数如下:VIPA 厚度  $t=1.686$  mm,折射率  $n=1.5$ ,入射角  $\theta_{\text{in}}=2.5^\circ$ ,波长取值  $1\,555 \sim 1\,565$  nm。由于出射光的锥角实际很小,因此,假定  $\Delta\theta=\theta_{\text{out}}-\theta_{\text{in}}$  取值也较小,在  $\pm 5^\circ$  之间。由此,可以近似地计算出自由谱宽(Free spectral range, FSR)

$$\lambda_{\text{FSR}} \approx \frac{\lambda_{\text{中心波长}}}{m} \approx 0.48 \text{ nm} \quad (5)$$

类似光栅的色散系数,定义  $y$  方向上的色散系数

$$C_y = f \cdot \frac{d\theta_{\text{VIPA}}}{d\lambda} = -\frac{2f \cdot (n^2 - \sin^2\theta_{\text{VIPA}})}{\lambda \sin(\theta_{\text{VIPA}})} \quad (6)$$

式中: $\lambda$ 为中心波长, $\theta_{\text{VIPA}}$ 为 VIPA 入射角, $n$ 为 VIPA 材料的折射率。这一参数反映了在  $y$  方向上空-频映射的对应关系。

由此可以计算视场高度可表示为

$$y = |C_y \cdot \Delta\lambda_{\text{FSR}}| = \left| -\frac{f \cdot \lambda \cdot (n^2 - \sin^2\theta_{\text{VIPA}})}{n \cdot t \cdot \sin(\theta_{\text{VIPA}} \cos(\theta_g))} \right| \quad (7)$$

$y$  方向分辨率

$$\delta y \approx C_y \cdot \delta\lambda_y \quad (8)$$

式中: $\delta\lambda_y$ 不只由空间色散性能决定,还受到频时映射过程中非理想色散傅里叶变换以及系统后端数据采集装置的采样率制约。

观察两个维度 FOV 长度与分辨率的关系,可以发现它们都是与成像透镜的焦距  $f$  成正比的,因此可以选用不同的成像透镜来改变分辨率。但也发现更换透镜是不能改变 FOV 的尺寸与分辨率的比值的,定义此比值为可分辨行(列)数,它表征系统的一种相对分辨率

$$N_{2D-x} = \frac{\Delta\lambda_{\text{SS}}}{\Delta\lambda_{\text{FSR}}} \quad (9)$$

$$N_{2D-y} = \Delta\lambda_{\text{FSR}} \cdot \text{GVD} \cdot f_{\text{det}}$$

$$N_{2D} = N_{2D-x} \cdot N_{2D-y}$$

式中: $N_{2D-x}$ 为可分辨的列数, $N_{2D-y}$ 为可分辨的行

数,它们的乘积  $N_{2D}$  为系统可分辨的总点数。在实验中,使用的是焦距  $f=6\text{ cm}$  的成像透镜,此时各项参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Parameters in experiment

映射常数	$C_x$	$8.82\text{e}+4$
	$c_y$ (取 $\theta_{\text{VIPA}}=5^\circ$ )	$1.00\text{e}+6$
视场/mm	$\Delta x$	0.88
	$\Delta y$	0.48
分辨率/ $\mu\text{m}$	$\delta x$	42.4
	$\delta y$	62.4
成像点数	$N_{2D-x}$	21
	$N_{2D-y}$	8
	$N_{2D}$	168

在实验中,仍然使用 USAF-1951 目标板作为成像物体,目标选定编号 3-1 的图案,形状为 3 道相间的条纹。接收到其时域上一个脉冲的波形,见图 7(a)。由此波形可还原为二维图像,结果见图 7(b)。

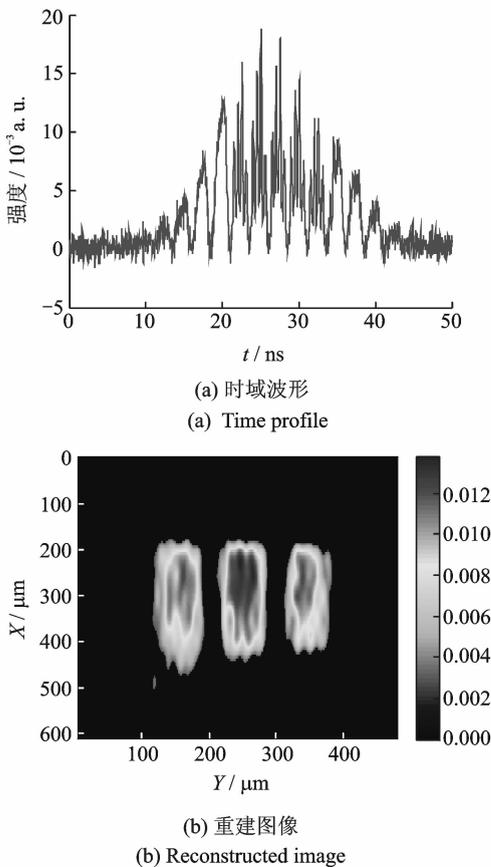


图 7 由时域波形恢复重建结果(标准图案 3-1)

Fig. 7 Reconstructed image of USAF-1951 group 3 element 1 by time profile

同样对由大到小的目标依次成像,找到所能清晰成像的最小图案,由此测出系统实际分辨率:纵

向约  $78.7\ \mu\text{m}$ ,横向约  $55.7\ \mu\text{m}$ ,分别对应编号 2-5,3-2 的图案。

此后又以目标板上的数字“2”为目标进行了成像,线条宽度约为  $56\ \mu\text{m}$ 。结果见图 8,从图中可见,横向分辨率要比纵向分辨率更加清晰,这是由于纵向分辨率受到 VIPA 的 FSR 限制,如果采用 FSR 较大的 VIPA,纵向分辨率将会有更进一步的提高。

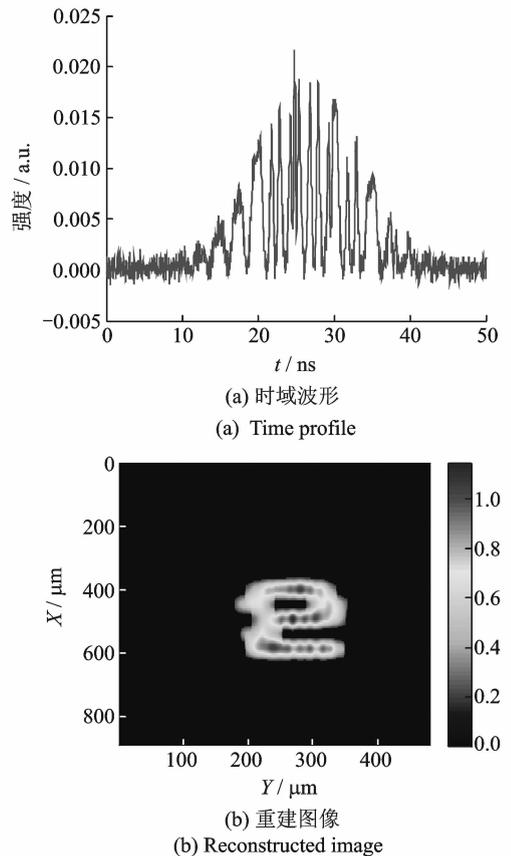


图 8 由时域波形恢复重建结果(数字 2)

Fig. 8 Reconstructed image of number 2 by time profile

## 2 结束语

本文面向超快成像应用,提出并实验验证了一种超快平面显微成像技术。这项技术应用了色散傅里叶变换和空间色散原理对超短光脉冲进行了时-空-频映射,把承载在光谱上的成像信息转化为快速串行信号,并且利用高速单像素光电探测接收与图像重构。这种方法克服了机械快门和图像传感器阵列等多种速度限制因素,使得成像速度大大提高。通过实验搭建了一维及二维成像平台,实现了帧速率  $20.9\ \text{MHz}$ ,空间分辨率分别为  $22\ \mu\text{m}$  和  $55\ \mu\text{m}$  的高速成像实验,验证了本技术在超快成像方面的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Etoh T G, Le C v, Hashishin Y, et al. Evolution of ultra-high-speed CCD imagers [J]. Plasma Fusion Research, 2007,2;S1021.
- [2] Liu Wennuan, Sari L, Sofia K. Copy number analysis indicates monoclonal origin of lethal metastatic prostate cancer [J]. Nature Medicine, 2009,15(5): 559-565.
- [3] Kumar A. Computer-vision-based fabric defect detection: A survey [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2008, 55(1):348-363.
- [4] Thoroddsen S T, Etoh T G, Takehara K. High-speed imaging of drops and bubbles [J]. Annu Rev Fluid Mech, 2008,40:257-285.
- [5] Goda K, Tsia K K, Jalali B. Amplified dispersive Fourier-transform imaging for ultrafast displacement sensing and barcode reading [J]. Appl Phys Lett, 2008,93(13):131109.
- [6] Goda K, Tsia K K, Jalali B. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena [J]. Nature, 2009, 458 (7242): 1145-1149.
- [7] Goda K, Jalali B. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements [J]. Nature Photonics, 2013,7(2):102-112.
- [8] Tearney G J, Webb R H, Bouma B E. Spectrally encoded confocal microscopy [J]. Optics Letters, 1998, 23(15):1152-1154.
- [9] Masataka S. Virtually imaged phased array [J]. Fujitsu Scientific & Technical Journal, 1999, 35(1): 113-125.
- [10] Tsia K K, Goda K, Capewell D, et al. Performance of serial time-encoded amplified microscope [J]. Optics Express, 2010,18(10):10016-10028.

**作者简介:**陈宏伟(1979-),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向:高速激光成像、微波光子学和光信号处理, E-mail:chenhw@tsinghua.edu.cn;邢芳俭(1988-),男,博士研究生,研究方向:高速激光成像;王雨西(1990-),男,硕士研究生,研究方向:高速激光成像;雷诚(1986-),男,博士后,研究方向:微波光子学,高速光纤通信系统;陈明华(1971-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:高速光纤通信、光网络和微波光子学;谢世钟(1947-),男,硕士,教授,博士生导师,研究方向:高速光纤通信、微波光子学。

