

光学学报

基于衍射光学元件的全光分幅成像技术

李彦锦¹, 周朗¹, 李卓¹, 施蕊¹, 王欣¹, 杨苏辉^{1,2*}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 超快成像技术可用于研究爆炸、高压放电等超快现象, 其中, 全光分幅成像技术可克服光电转换的时间限制, 具有很大的发展前景。利用衍射光学元件和窄带滤波片搭建了全光空间分幅成像系统, 成功实现阵列分幅成像, 并分析了不同波段的成像效果。实验结果表明, 所设计的全光空间分幅成像系统, 可在不同波段内实现 4×4 阵列的 16 分幅成像; 且图像幅间的非均匀性相对标准偏差为 7.4%, 幅内非均匀性均值为 2.83%, 全光分幅成像系统在分辨率为 35 lp/mm 时的调制传递函数为 0.991。

关键词 超快光学; 分幅成像; 二维成像; 衍射光学元件

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0232001

All-Optical Framing Imaging Technology Based on Diffractive Optical Elements

Li Yanjin¹, Zhou Lang¹, Li Zhuo¹, Shi Rui¹, Wang Xin¹, Yang Suhui^{1,2*}

¹ School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China

Abstract Ultrafast imaging is an important method for studying ultrafast phenomena such as explosions and high-voltage discharges. All-optical framing imaging has great development prospects because it can overcome the time limitation of optical-to-electric signal conversion. In this study, an all-optical spatial framing imaging system is constructed using a diffractive optical element and a band pass filter, the array framing imaging is successfully realized, and the results of different bands are analyzed. The experimental results show that the designed all-optical spatial framing imaging system can realize 16-framing imaging in a 4×4 array in different wavelength bands. The relative standard deviation of the non-uniformity between the image frames is 7.4%, and the average deviation of the non-uniformity within a frame is 2.83%. Further, the modulation transfer function of the all-optical framing imaging system is 0.991 at resolution of 35 lp/mm.

Key words ultrafast optics; framing imaging; two-dimensional imaging; diffractive optical element

OCIS codes 320.7080; 320.7160; 350.2770

1 引言

超快成像技术能够捕捉到皮秒(10^{-12} s)甚至飞秒(10^{-15} s)量级的超快现象, 广泛应用于材料科学、非线性光学、等离子体物理学、弹道及射程研究、爆炸研究、冲击波研究等领域^[1-5], 这些领域都要求超快成像技术具有高时间和空间分辨能力。受 CCD 和 CMOS(互补金属氧化物半导体)等电子器件响

应速度的限制, 传统电子高速成像技术获取二维图像的速度极限仅为 10^{-7} s 量级^[6]。基于抽运探测法的超快成像技术的时间分辨率为一个探针光的脉冲宽度, 缺点是只能拍摄可重复的现象^[7-9]。条纹相机可单次拍摄得到多幅图像, 时间分辨率在 10^{-13} s 量级, 但只能实现一维成像^[10]。超快压缩摄影(CUP)技术虽然可以实现时间分辨率为 10^{-11} s 量级的二维成像, 但也是通过对一维条纹相机图像先

收稿日期: 2020-07-14; 修回日期: 2020-08-09; 录用日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(61835001)

* E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

进行空间解码,然后进行二维图像重组实现的^[11]。

为了避免传统成像技术中光电转换的限制,人们提出了两种可拍摄非重复现象的全光二维成像技术,包括连续时间编码放大显微技术(STEAM)^[12]和时序全光成像技术(STAMP)^[13]。STEAM 是一种利用单脉冲、单像素光电二极管进行全光二维连续成像的方法,其时间分辨率为 163 ns,成像帧频由飞秒激光的重复频率决定。STAMP 使用线性啁啾光脉冲作为信号光,利用波长色散器件实现脉冲展宽。不同波长的子光束携带不同时刻的目标二维图像信息,依次在 CCD 相机的不同位置成像。为实现不同波长的空间分离,需特制复杂的潜望镜分幅结构,由于结构加工困难,目前仅能实现 6 分幅。为实现 STAMP 总幅数的灵活扩展,Suzuki 等^[14]基于光谱滤波(SF)技术提出了 SF-STAMP,用衍射光学元件(DOE)实现了探测光的空间分束,子光束数量即为系统分幅数,并用窄带滤波片(BPF)对每个子光束进行光谱滤波。每个子光束相对 BPF 的入射角不同,导致 BPF 滤出的光束波长也不相同,不同波长携带了目标不同时刻的图像信息。Suzuki 等^[15-18]研究的 SF-STAMP 可实现 785~825 nm 波长范围内的 25 分幅成像,时间分辨率为 133 fs。

本文使用的实验系统为基于 DOE 搭建的全光分幅成像系统。传统的 DOE 衍射阵列大多为正方形阵列,无论在边长方向还是在对角线方向得到的阵列都是轴对称的,与 BPF 配合使用时,为了使每幅子图像的成像波长不同(阵列子光束对 BPF 的入射角不同),不能简单地选择边长或对角线方向确定 DOE 和 BPF 的夹角,从而增加了结构设计和系统

安装的难度。而矩形阵列的 DOE 在对角线上是阵列不对称的,可以更简单地实现阵列光束对 BPF 的不同入射角,从而改善常规正方形衍射器件在光路装调上的弊端,降低系统设计和组装的难度。将 BPF 设计为与传统全光分幅成像系统不同的角度可调节结构,使系统可以改变成像波段和波长差(帧间隔)。实验中使用近红外光源,在 BPF 倾角不同时实现不同波段的阵列分幅成像,完成波长信息的空间分离;同时从更多角度评价了系统的成像质量。此外,当光源为线性调频脉冲光时,配合色散装置,该成像系统可完成波长信息的时间分离,实现单脉冲超快成像。这表明全光分幅成像技术可用于冲击波传播、等离子物理、光化学和激光加工等领域超快现象的研究,具有广阔的发展前景。

2 基本原理

DOE 为一个二维达曼光栅,符合光栅方程 $\Lambda \sin \beta = m\lambda$,其中, Λ 为光栅周期, β 为衍射角度, λ 为入射光的波长, m 为衍射级次。由于 DOE 为二维光栅,在 x 轴和 y 轴方向上同时遵守光栅方程,衍射角度分别为 β_x 和 β_y 。在 4×4 阵列矩形分束 DOE 中,有效衍射级次设计为 ± 1 级和 ± 3 级,且 $+3$ 级和 $+1$ 级、 $+1$ 级和 -1 级、 -1 级和 -3 级衍射光束之间的夹角近似相等,可称其为分束角 θ_s (包括 θ_{sx} 和 θ_{sy}); $+3$ 级与 -3 级之间的衍射夹角被称为全衍射角 θ_{lx} 和 θ_{ly} ;二维衍射中的最大衍射角 θ_{max} 为衍射阵列对角线上两端光束的夹角,即 $+3$ 、 $+3$ 级和 -3 、 -3 级(或 $+3$ 、 -3 级和 -3 、 $+3$ 级)衍射光束的夹角,如图 1(a)所示,其中,@800 nm 表示此处衍射角度数据为 800 nm 波长入射光下测出的。

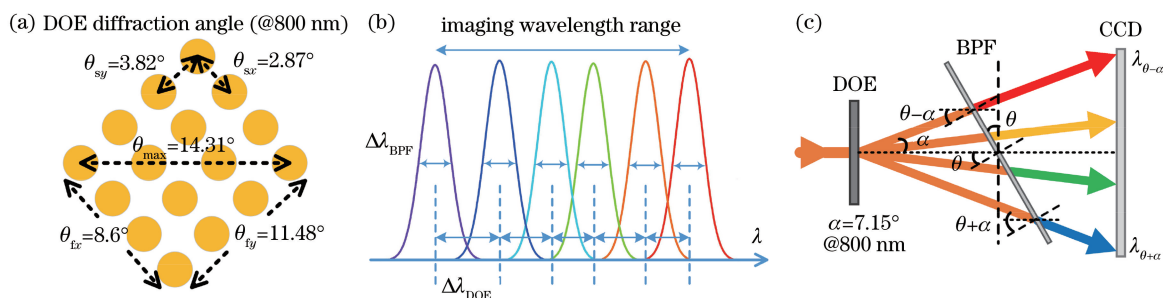


图 1 分幅滤波示意图。(a) DOE 的分幅角度;(b)帧间隔;(c) BPF 滤波

Fig. 1 Schematic diagram of framing filtering. (a) Framing angle of DOE; (b) frame interval; (c) BPF filtering

图 1(c)为入射光经过 DOE 和 BPF 产生波长分束的示意图。首先,入射光经过 DOE 被转换成阵列光束,并以一定的衍射角度传播。即 DOE 将入射光复制成多束阵列光,并在空间上分离,因此,

DOE 产生的光束决定了分幅成像系统的幅数。此外,经 DOE 衍射后,子光束自身存在一定程度的色散,会导致同一子光束内不同波长的光对应 BPF 的入射角略有差异,而 BPF 在特定入射角度只能通过

特定中心波长的窄带光束,因此可忽略子光束产生的色散对系统成像的影响。由 DOE 产生的光束会被 BPF 滤选为不同的窄带光束,传输光的波长取决于 BPF 入射光的入射角^[13],可表示为

$$\lambda_{\theta} = \lambda_0 \left(1 - \frac{\theta^2}{2n_{\text{eff}}^2} \right), \quad (1)$$

式中, λ_{θ} 为光通过 BPF 后的光束波长, λ_0 为 BPF 的中心波长, n_{eff} 为 BPF 的等效折射率。可通过旋转 BPF 改变阵列光的入射角和传输波长。如图 1(c) 所示,BPF 相对 DOE 的倾斜角为 θ ,DOE 的最大全衍射角 θ_{max} 为 2α ,阵列光对于 BPF 的入射角范围为 $\theta - \alpha$ 到 $\theta + \alpha$,得到 BPF 从宽带光中滤出的最长波长为 $\lambda_{\theta - \alpha}$,最短波长为 $\lambda_{\theta + \alpha}$,系统的最大波长差为 $\Delta\lambda = \lambda_{\theta - \alpha} - \lambda_{\theta + \alpha}$ 。图 1(b) 为系统成像中心波长帧间隔的示意图,可以发现,在波段 $\lambda_{\theta + \alpha} \sim \lambda_{\theta - \alpha}$ 内可获得中心波长不同的 n 幅图像,其成像平均帧间隔为 $\Delta\lambda/n$,全光分幅成像实验系统中 n 为 16。通过控制 DOE 和 BPF 的夹角可实现不同波段范围内的分束并改变成像中心波长的平均帧间隔。如果使用线性调频宽带激光脉冲作为探测光,通过色散装置后 BPF 的波长选择相当于分幅成像系统的时间映射装置,不同波长对应不同时刻的图像信息。可通过改变 BPF 的角度改变成像波长及其间隔,从而改变超快现象中被记录的时刻。在此过程中,调频光可在时间和空间上被分解成不同的波长成分。

系统的光路图如图 2 所示,准直光束沿 z 轴(光轴)垂直入射到 DOE,被衍射分束成方向不同、强度不同的 4×4 阵列,共 16 束光,并以不同的入射角通过 BPF。DOE 将正入射的平行光分束成阵列子光束,每束子光束仍为平行光,但彼此有夹角(传输方向不同),输出的子光束携带与输入光相同的信息(除光强及传播方向外)。DOE 绕 z 轴(光轴)旋转,直至 DOE 的对角线与 x 轴平行,使 16 束子光束在 BPF 上的入射角均不同,从而实现 16 束子光束携带不同的波长信息。

CCD 接收镜头用于将分幅后的阵列子光束同时成像在整个系统像面 CCD 感光芯片的不同位置上,即在 1 幅图像上获得由 16 幅图像组成的阵列图像。DOE 位于 CCD 接收镜头的前焦面,CCD 感光芯片位于 CCD 接收镜头的后焦面。

3 实验装置及结果

3.1 实验装置

分幅滤波系统包括 DOE 和 BPF 两个主要器

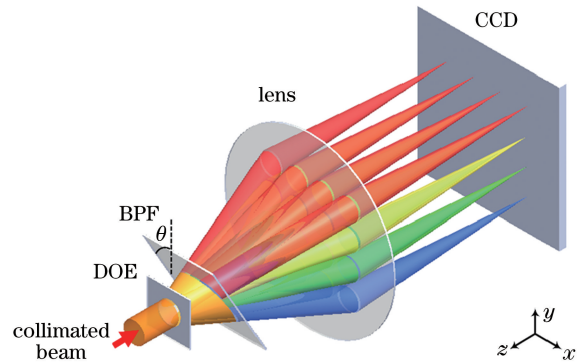


图 2 分幅成像系统光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path of framing imaging system

件,可将 DOE 看作一个二维衍射光栅,用于将探针光在空间中分束成 4×4 矩形阵列。每个子光束以不同入射角照射到具有一定倾斜角度的 BPF 上。BPF 对不同入射角度的子光束具有波长选择透过性,可从宽带光束中滤出多个中心波长不同的窄带光谱。

成像接收系统为一个 CCD 接收镜头,用于将分幅出的 4×4 阵列窄带光束同时成像在探测器 CCD 感光芯片的不同位置上。该系统中,准直光由分幅系统中的 DOE(HOLO/OR MS-325-800-Y-A)产生 4×4 阵列光束,且衍射分束角 $\theta_{\text{sx}} = 3.82^\circ$, $\theta_{\text{sy}} = 2.87^\circ$ (测试光在波长为 800 nm 处)。由 DOE 衍射的阵列光经过中心波长为 830 nm 的 BPF(IRIDI-AN ZX000167)实现空间分离,其中,BPF 的光谱带宽为 2.2 nm,透过率大于 90%。最后由焦距为 25 mm 的接收镜头在 CCD 探测器(海康威视 DS-2CD2820F)上进行成像。用上述分幅成像系统进行成像实验,分幅成像系统的模型如图 3 所示。用宽波段卤素灯作为光源(闻奕光电 HL100-10W),其波长范围为 360~2500 nm。

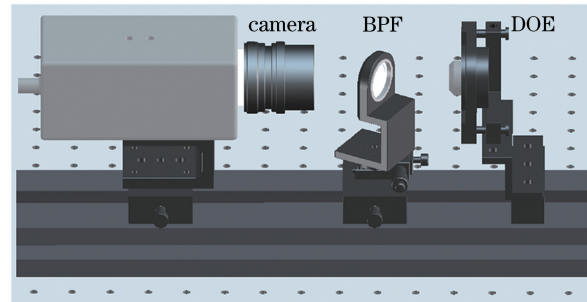


图 3 分幅成像系统的模型

Fig. 3 Model of framing imaging system

实验发现,杂散光的存在会影响 CCD 相机对近红外波段的采集,在系统结构中进行光路封闭,可有效遮挡可见光的杂散辐射;同时在光路中采用可见

光截止滤光片,以消除可见光波段的杂散辐射对分幅成像的影响。

3.2 实验结果

3.2.1 分幅成像波长与帧间隔

实验选用的 DOE 器件最大全衍射角 $\theta_{\max}(2\alpha)$ 为定值,当 BPF 所在平面相对于 DOE 所在平面的倾斜角 θ 为 30° 时,边缘光束的入射角 $\theta-\alpha$ 和 $\theta+\alpha$ 分别为 23.17° 和 37.08° 。计算出 DOE 衍射的 16 个子光束相对于倾斜 BPF 的入射角及波长(n_{eff} 为 1.88),并测出实际波长,结果如表 1 所示,依次为 $\theta_1, \lambda_{t1}, \lambda_{r1}, \theta_2, \lambda_{t2}, \lambda_{r2}, \dots, \theta_n, \lambda_{tn}, \lambda_{rn}$, n 为子光束序号, λ_{t1} 为 1 号子光束的理论中心波长, λ_{r1} 为 1 号子光束的实际中心波长。

表 1 BPF 倾角为 30° 时的窄带光谱参数

Table 1 Narrowband spectrum parameter when BPF angle is 30°

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\theta / (^\circ)$	23.17	24.87	26.14	26.75	27.70	28.76	29.32	29.41	30.73	31.28	32.32	32.60	33.92	34.05	35.40	37.08
λ_t / nm	810.8	807.9	805.6	804.4	802.6	800.4	799.3	799.1	796.2	795.0	792.6	792.0	788.8	788.5	785.2	780.8
λ_r / nm	810.5	807.4	805.2	804.0	802.2	800.1	799.0	798.8	796.0	794.8	792.7	792.1	789.1	788.7	785.7	782.1

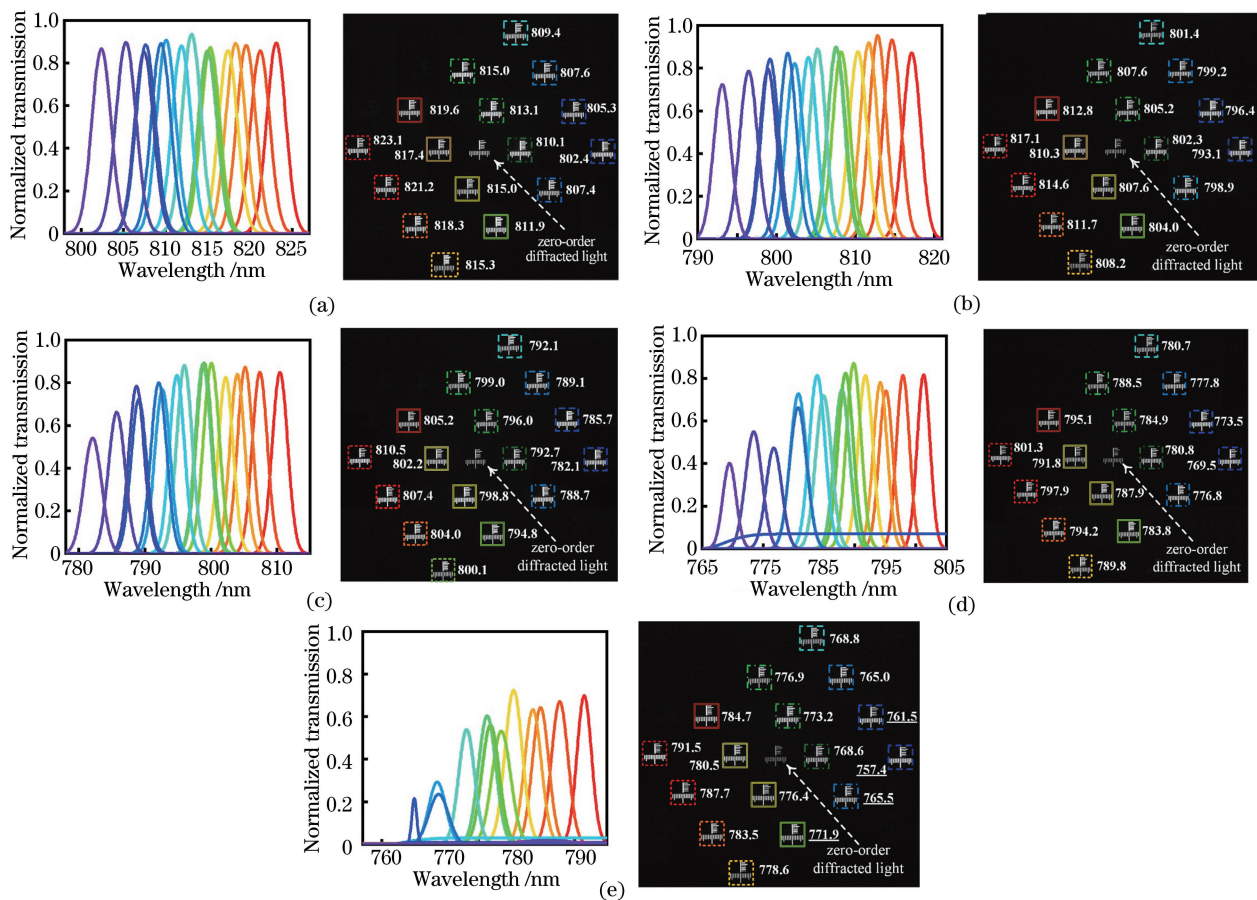


图 4 不同 θ 时的窄带光谱和成像阵列图。(a) $\theta=20^\circ$; (b) $\theta=25^\circ$; (c) $\theta=30^\circ$; (d) $\theta=35^\circ$; (e) $\theta=40^\circ$

Fig. 4 Narrow band spectra and imaging array diagrams at different θ .

(a) $\theta=20^\circ$; (b) $\theta=25^\circ$; (c) $\theta=30^\circ$; (d) $\theta=35^\circ$; (e) $\theta=40^\circ$

由表 1 可知,子光束波长的实际值和理论值相差不大,且入射角不同时的变化趋势一致,这表明理论值对实际情况具有参考作用。BPF 的倾角 θ 不同时,16 束子光束对 BPF 的入射角均不同。当 BPF 的倾角一定时,16 束子光束对 BPF 的入射角分别为 $\theta_{1,1}(\theta_1-\alpha), \theta_{1,2}, \dots, \theta_{1,16}(\theta_1+\alpha)$, 其中, $\theta_{1,2}$ 为 BPF 倾角为 θ_1 时 2 号子光束对 BPF 的入射角。使用扫描光栅光谱仪(Omini300 λ)依次测量 BPF 在 $\theta=20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ 时,五组子光束透射的窄带光谱和相应的成像阵列图,结果如图 4 所示。为了更直观地呈现光谱滤波规律,对窄带滤波光谱曲线进行了归一化处理,成像阵列图中标注的数据为成像中心波长,单位为 nm。

当 BPF 的倾角为 20° 时,阵列成像光中的最大中心波长为 823.1 nm,最小中心波长为 802.4 nm,相邻窄带光谱的平均中心波长差为 1.29 nm,波长分辨率(平均帧间隔)也为 1.29 nm,此时各图像的中心波长透过率较高且接近,成像效果相对最优;当 BPF 的倾角为 25° 时,最大中心波长为 817.1 nm,最小中心波长为 793.1 nm,波长分辨率为 1.50 nm,此时各图像中心波长透过率随波长的减小而减小,但差值不大,成像效果较优;当 BPF 的倾角为 30° 时,最大中心波长为 810.5 nm,最小中心波长为 782.1 nm,波长分辨率为 1.78 nm,此时各图像的中心波长透过率随波长的减小而减小,且差值明显,但成像效果仍能得到保障;当 BPF 的倾角为 35° 时,最大中心波长为 801.3 nm,最小中心波长为 769.5 nm,波长分辨率为 1.99 nm,此时各图像中心波长的透过率随波长的减小而减小,且差值略大,在光源足够明亮的情况下,仍能得到较好的成像结果;当 BPF 的倾角为 40° 时,最大中心波长为 791.5 nm,最小中心波长为 757.4 nm,波长分辨率为 2.13 nm,此时光谱仪探测到的光谱信号中有 4 个短波光谱信号,即图 4(e)中带下划线的数据没有足够明显的峰值,但实验系统使用 CCD 探测器可以拍摄到清晰的图像。这种情况下,各图像中心波长透过率随波长的减小而减小,且差值较大,成像效果受到一定影响,但在 CCD 探测器足够灵敏的情况下仍能得到不错的成像结果。

图 5 为成像帧间隔(波长分辨率)与 BPF 倾角的关系,可以看出,随着 BPF 倾角的不断增大,成像波段向短波方向移动,且帧间隔也逐渐增大。原因是 BPF 的倾角 θ 随 BPF 与 DOE 摆放位置的变化

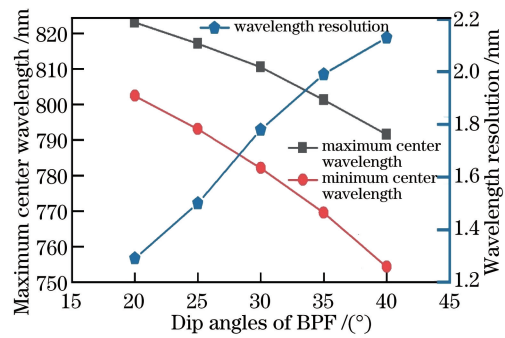


图 5 成像最小中心波长、最大中心波长和帧间隔与 BPF 倾角的关系

Fig. 5 Relationship between minimum center wavelength, maximum center wavelength, frame interval and dip angles of BPF

而变化,导致阵列光束对 BPF 的入射角发生变化,进而改变了 BPF 滤过的波长。

在成像结果中,除了 16 幅阵列图像,中心还有 1 幅稍暗的图像,原因是 BPF 器件不能完全滤除零级衍射光,但对其他 16 幅阵列图像没有任何影响。此外,在窄带光谱曲线图中,波长小于 800 nm 的信号波长越小,透过的光信号越弱,原因是 BPF 器件在正入射时对 830 nm 处的波长透过率最高,在 830 nm 附近的光信号较强,远离一定范围后的波长透过率越低、信号越弱。因此,在 BPF 倾角最小 ($\theta=20^\circ$) 时,整体光信号最强。

3.2.2 幅间非均匀性和幅内非均匀性

在 BPF 与 DOE 的夹角为 30° 时,分析了系统成像的幅间非均匀性和幅内非均匀性。用高速摄像机采集的图像如图 6(a)所示(全白图阵列),并用 Matlab 软件分析各子图像内像素点的灰度平均值,得到的幅间非均匀性结果如表 2 所示。

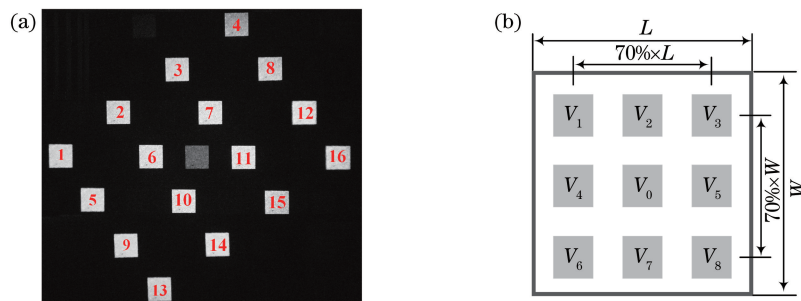


图 6 辐射均匀度测试图。(a)幅间均匀度;(b)幅内均匀度

Fig. 6 Test chart of radiation uniformity. (a) Inter-frame uniformity; (b) intra-frame uniformity

表 2 灰度平均值

Table 2 Average of gray

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
\bar{V}	211.1	219.1	214.7	162.7	216.4	224.2	226.2	205.1	218.1	226.3	227.0	221.4	207.6	225.8	225.6	204.4

计算得到图像的幅间非均匀性相对标准偏差为 7.4%，这表明该全光分幅成像系统的成像幅间均匀性良好。为了分析图像的幅内均匀性，选取其中 1 幅子图像，并在图像上选取如图 6(b)所示的 9 个面元，通过计算小面元的像素灰度平均值计算单幅图像的非均匀性。图 6(b)中 L 为长， W 为宽，取一行首、末面元中心点的距离为长的 70%，取一列首末面元中心点的距离为宽的 70%，每行/列的小面元等大且均匀分布。

用图像上各面元灰度之间的最大偏差与 9 个面

元灰度均值比的一半作为该分幅图像的非均匀性值 ϵ ，可表示为^[19,20]

$$\epsilon = 100\% \times (V_{\max} - V_{\min}) / 2\bar{V}, \quad (2)$$

式中， $V_{\max} = \max(V_j)$ ， $V_{\min} = \min(V_j)$ ， $j = 0, 1, \dots, 8$ ， V_{\max} 、 V_{\min} 分别为图像上任意点上像元的最大、最小强度值， \bar{V} 为 9 个面元的灰度均值。单幅图像的幅内非均匀性 N 如表 3 所示，计算得到幅内非均匀性的均值为 2.83%，最大值为 9.90%，最小值为 1.10%，这表明该系统阵列图像具有良好的幅内均匀性。

表 3 单幅图像非均匀性

Table 3 Non-uniformity of single image

unit: %

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N	1.25	1.30	3.54	9.90	1.50	1.53	2.07	6.19	2.25	1.56	1.64	2.27	3.05	1.41	1.10	4.72

3.2.3 光学传递函数

在 BPF 与 DOE 夹角为 30°的情况下，以波长为 (808±10) nm 的激光为光源，通过刀口法对系统成像的光学传递函数进行分析。图 7 为全光分幅成像系统的调制传递函数(MTF)曲线，横坐标为空间分辨率，单位为线对每毫米(lp/mm)，纵坐标为 MTF，MTF 越接近 1，表明系统的光学传递质量越好。若 MTF 大于 0.9，表明系统的性能非常优秀；若 MTF

为 0.7~0.9，表明系统的性能比较优秀；若 MTF 小于 0.5，表明系统的性能较差。实验中使用的相机像元尺寸为 2.69 μm，相机的极限空间分辨率为 185.97 lp/mm，即系统 MTF 的奈奎斯特频率为 185.97 lp/mm。

以衍射级次(-3, -1)子图像的 MTF 曲线为例，全光分幅成像系统在 35 lp/mm 时 MTF 为 0.991，即在该分辨率下系统的光学成像性能非常优秀。此外，当系统的 MTF 为 0.95, 0.90, 0.85, 0.80 时，对应的空间分辨率分别为 89, 121, 163, 184 lp/mm，这表明衍射级次为(-3, -1)的子图像在极限空间频率内具有良好的成像性能。

不同衍射级次子图像的 MTF 特殊点取值如表 4 所示，可以发现，不同衍射级次子图像对应的 MTF 曲线相似，在系统奈奎斯特频率处的 MTF 均大于 0.7，此时系统各衍射级次子图像仍有优秀的光学传递质量，这表明系统在极限空间频率内都具有良好的成像性能。

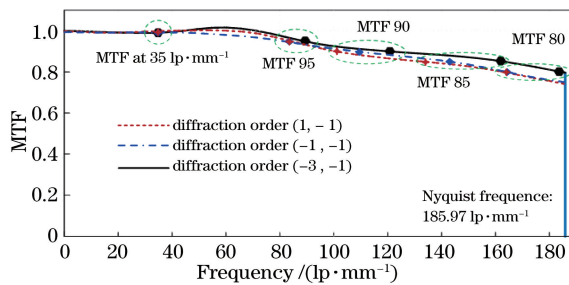


图 7 分幅系统不同衍射级次子图像的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of sub-images at different diffraction orders in framing imaging system

表 4 不同衍射级次子图像 MTF

Table 4 MTF of sub-images at different diffraction orders

Diffraction order	MTF at a specific frequency		Frequency at a specific MTF/(lp·mm ⁻¹)			
	35 lp/mm	Nyquist	0.95	0.90	0.85	0.80
(1, -1)	0.999	0.745	84	109	143	164
(-1, -1)	1	0.740	84	101	134	163
(-3, -1)	0.991	0.796	89	121	163	184

4 结 论

基于衍射光学元件实现了 16 分幅成像，并通过实验验证了所设计的空间分幅成像系统可实现波长上的展开和空间上的分离成像。系统中 BPF 的安

装设计为角度可调节结构，通过旋转 BPF、改变 BPF 与 DOE 器件的夹角，改变阵列成像的波长范围和波长差(帧间隔)，得到了五组 4×4 阵列的 16 分幅成像。分析了系统成像的非均匀性(包括幅间非均匀性和幅内非均匀性)和光学传递函数，实验结

果表明,图像幅间非均匀性相对标准偏差为 7.4%,幅内非均匀性的均值为 2.83%,最大值为 9.90%,最小值为 1.10%;且在系统极限空间频率内,MTF 均大于 0.7,表明该分幅成像系统的成像性质优良,可满足科研需要。此外,可以通过在 DOE 器件前加分束棱镜,扩展整个系统的分幅数量。当光源利用线性调频脉冲时,便可将不同波长的光信号转换为不同时刻的光信号,实现单脉冲超快成像。

参 考 文 献

- [1] Sakakura M, Terazima M, Shimotsuma Y, et al. Observation of pressure wave generated by focusing a femtosecond laser pulse inside a glass[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5674-5686.
- [2] Hockett P, Bisgaard C Z, Clarkin O J, et al. Time-resolved imaging of purely valence-electron dynamics during a chemical reaction[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(8): 612-615.
- [3] Šiaulytis N, Melninkaitis A, Dubietis A. In situ study of two interacting femtosecond filaments in sapphire[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2285-2288.
- [4] Garipey G, Krstajić N, Henderson R, et al. Single-photon sensitive light-in-flight imaging[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6021.
- [5] Cai H Z, Liu J Y, Fu W Y, et al. Gated framing camera with three channels and its trigger jitter measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0204001.
蔡厚智, 刘进元, 付文勇, 等. 三通道门控分幅相机及其触发晃动测量[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0204001.
- [6] Etoh T G, Vo le C, Hashishin Y, et al. Evolution of ultra-high-speed CCD imagers[J]. *Plasma and Fusion Research*, 2007, 2: S1021.
- [7] Downer M C, Fork R L, Shank C V. Femtosecond imaging of melting and evaporation at a photoexcited silicon surface[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1985, 2(4): 595-599.
- [8] Domke M, Rapp S, Schmidt M, et al. Ultrafast pump-probe microscopy with high temporal dynamic range[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10330-10338.
- [9] Unger C, Koch J, Overmeyer L, et al. Time-resolved studies of femtosecond-laser induced melt dynamics[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24864-24872.
- [10] Hamamatsu Photonics K K, Guide to streak cameras [EB/OL]. [2020-07-01]. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SHSS0006E_STREAK.pdf.
- [11] Gao L, Liang J, Li C, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. *Nature*, 2014, 516(7529): 74-77.
- [12] 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.
- [13] Nakagawa K, Iwasaki A, Oishi Y, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(9): 695-700.
- [14] Suzuki T, Isa F, Fujii L, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 30512-30522.
- [15] Suzuki T, Hida R, Yamaguchi Y, et al. Single-shot 25-frame burst imaging of ultrafast phase transition of Ge₂Sb₂Te₅ with a sub-picosecond resolution[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(9): 092502.
- [16] Suzuki T, Hida R, Isa F, et al. Single-shot multi-spectral imaging and ultrafast 2D-imaging by sequentially timed all-optical mapping photography utilizing spectral filtering (sf-stamp) system[C]//*Imaging and Applied Optics 2016*, July 25-28, 2016, Heidelberg, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2016: IW1E.3.
- [17] Hida R, Suzuki T, Isa F, et al. Multispectral imaging using sequentially timed all-optical mapping photography utilizing spectral filtering (sf-stamp) system[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics: Science & Innovations 2016*, June 5-10, 2016, San Jose, CA, USA. Washington, D. C.: OSA, 2016: SM2I.4.
- [18] Suzuki T, Hida R, Ueda R, et al. Single-shot ultrafast 2D-burst imaging by stamp utilizing spectral filtering (sf-stamp) [C]//*International Conference on Ultrafast Phenomena*, July 17-22, 2016, Santa Fe, New Mexico. Washington, D. C.: OSA, 2016: UTh4A.18.
- [19] Li Z, Li P, Shan W. Infrared dynamic scenes test and evaluation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 406-410.
李卓, 李平, 单伟. 红外动态场景测试评价技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(3): 406-410.
- [20] Li P. Research of dynamic infrared scene generator performance test technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010: 40-41.
李平. 红外动态场景生成器性能测试技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010: 40-41.