

单发超快光场成像技术研究进展

宗兆玉^{1,2}, 赵军普¹, 张波¹, 夏彦文¹, 李平¹, 郑万国^{1*}¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;²中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088

摘要 单发超快光场成像技术能够在更广泛的条件下表征瞬态事件, 为探索不可重复和难以再现的超快现象打开了大门, 是探索未知领域必不可少的工具, 具有巨大的科学技术应用价值。介绍近年来单发超快光场成像技术的研究进展, 包括典型代表技术的工作原理、技术特点、应用、优势和局限性。首先综述主动式探测类方法, 介绍 5 小类共 15 种代表性技术, 然后简要介绍被动式探测类方法, 最后归纳总结各类单发超快光场成像技术的适用场景及存在的问题, 并展望了其未来可能的发展方向。

关键词 超快成像; 单发; 超快现象; 主动式探测; 时序映射

中图分类号 TN247; O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231906

Research Progress of Single-Shot Ultrafast Optical Imaging

Zong Zhaoyu^{1,2}, Zhao Junpu¹, Zhang Bo¹, Xia Yanwen¹, Li Ping¹, Zheng Wanguo^{1*}¹Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;²Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Single-shot ultrafast optical imaging is a technique that can characterize transient events under universal conditions, opening the door to the study of nonrepeatable and difficult-to-reproduce ultrafast phenomena. It is an essential tool for exploring unknown fields and has great scientific and technological value. This article introduces the research progress of single-shot ultrafast optical imaging in recent years, including the principles, technical characteristics, applications, advantages, and limitations of typical representative technologies. Specifically, we summarize the active detection methods, focusing on 15 representative techniques in 5 subcategories. Then, we provide a brief explanation of the passive detection methods. Finally, we review the applicable scenes and existing problems of various single-shot ultrafast optical imaging techniques and discuss the possible development trend in the future.

Key words ultrafast imaging; single-shot; ultrafast phenomenon; active detection; temporal mapping

1 引言

超快现象广泛存在于自然世界和科学技术研究中, 反映了物理^[1-3]、化学^[4-5]和生物学^[6]中许多重要的基本机制。超快现象一般发生在纳秒到飞秒时间尺度的二维空间中, 超快光学成像技术可以实现瞬态演化过程的二维可视化观测, 是研究超快动力学的重要工具, 一直受到科学技术领域研究人员的广泛关注^[7]。针对高度可重复的超快现象, 通常采用经典的泵浦-探针方法捕获瞬态事件的动力学演化过程, 探索潜在的影响机制^[8-9]。然而, 很多超快现象要么是不可重复

的, 要么是难以再现的, 例如超强激光成丝^[10-12]、元件损伤^[13-15]、不可逆化学反应^[4-5]等, 在这些情况下, 泵浦-探针方法难以发挥作用。此外, 针对重复频率低或发次与发次间有显著变化的瞬态事件, 如惯性约束聚变点火^[1-3, 16]、高密度等离子体演化^[17-19]等, 泵浦-探针方法不仅测量效率低, 而且不可能获得准确的动力学演化信息。泵浦-探针方法仅限于可重复性条件下的统计研究。

为了克服泵浦-探针方法的局限性, 近年来研究人员提出了一系列单发超快光场成像技术^[7, 20]。单发超快光场成像技术指仅通过单次曝光就能获取整个瞬态

收稿日期: 2023-08-14; 修回日期: 2023-09-24; 录用日期: 2023-10-13; 网络首发日期: 2023-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(62075201, 62205318)、中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金(RCFCZ6-2022-5)

通信作者: *wgzheng_caep@sina.com

事件的多幅时空分辨信息的技术,其中,“单发”表示单次曝光即可捕获整个瞬态事件,“超快”表示可实现纳秒到飞秒尺度的时间分辨,“光场”指可探测从极紫外到远红外的光谱信息,“成像”表示可获取空间(x, y)维度信息。单发超快光场成像技术能够在更广泛、更任意的条件下表征瞬态事件,开启了研究不可重复和难以再现超快现象的大门,已成为理解基础科学技术问题和实现高精度高效率测量必不可少的工具。单发超快光场成像领域的蓬勃发展得益于超短激光系统^[21-22]、超快探测器^[23-24]、新的计算理论框架^[25-26]的飞速进步。首先,超短激光系统产生的飞秒脉宽激光提供了杰出的时间切片能力,高带宽光谱为脉冲整形技术提供了光信标编码载体,高脉冲能量为单次曝光提供了足够的光子数,从而实现高信噪比测量。其次,新的器件结构和先进的制造技术不断促进超快探测器性能的提升,克服了传统探测器在板载存储和读出速度方面的限制,实现了更快的快门响应和更高的灵敏度。最后,以超快压缩成像为代表的先进光学计算理论的提出突破了传统光学成像系统的硬件限制,不断刷新时间分辨极限。根据照明方式的不同,单发超快光场成像技术可分为主动式探测和被动式探测两类^[7]。主动式探测类方法对子脉冲串进行编码标记,根据子脉冲携带光信标方式的不同,可分为空间分割、角度复用、时间波长映射和空间频率复用等,典型技术包括单发飞秒瞬态光学偏振测定术^[27]、时序全光摄影术^[28-29]、单发时频复用全息成像术^[30]和多次曝光频域识别术^[31]等。被动式探测类方法不对光信息进行直接调制,仅利用接收探测器记录时变的二维图像,可以进一步分为探测器直接探测类方法^[23]和图像重建类方法^[25-26]。

本文介绍并讨论了近年来单发超快光场成像技术的研究进展,包括典型代表技术的工作原理、技术特点、应用、优势和局限性。首先介绍主动式探测类方法,重点包括5小类总共15种代表性技术,然后简要介绍被动式探测类方法,最后归纳总结各类单发超快光场成像技术的适用场景和存在的问题,并对其发展趋势进行展望。

2 主动式单发超快光场成像技术

主动式探测方法通常采用超短脉冲串作为探针单元进行瞬态事件测量。如图1所示,每一个子脉冲被编码一个独特的光信标(以不同的颜色表示不同的光信标),如不同的空间位置、波长、角度、偏振态或空间频率,根据光信标属性,采用特殊设计的检测装置在空间(x, y)或频域空间(f_x, f_y)分离出不同时刻的二维瞬态场景,进而获得整个瞬态事件的演化过程。本节将介绍空间分割、时间波长映射、角度复用、空间频率复用和光束触发快门5小类单发超快光场成像技术。很多情况下,单发超快光场成像技术不是依靠单一的机制进行编码分离的,这里选取技术中最突出的特征进行分类阐述。

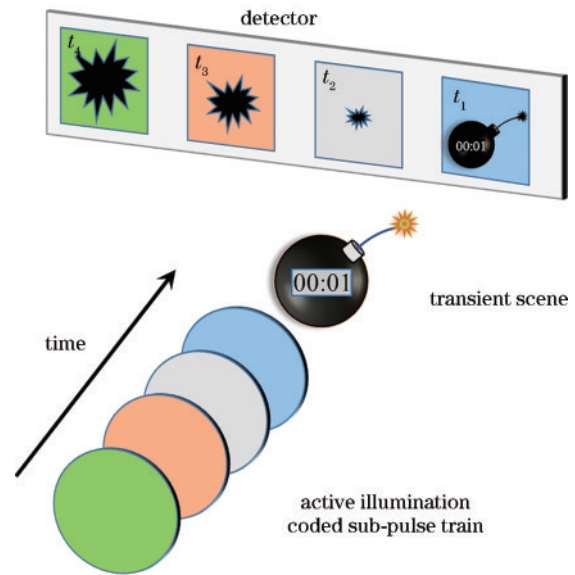


图1 基于主动式探测的单发超快光场成像技术示意图
Fig. 1 Conceptual illustration of active-detection-based single-shot ultrafast optical imaging technology

2.1 空间分割类

空间分割类方法的基本原理是:对超短探针脉冲进行空间和时序编码,不同时刻的子脉冲将瞬态事件投影到探测器的不同空间区域,进而记录瞬态演化信息(x, y, t)。很多单发超快光场成像技术利用了空间分割思路,这里重点介绍单发飞秒瞬态光学偏振测定术(SS-FTOP)^[27]和数字全息光飞行记录术(DLIF)^[32-33]。

基于空间分割思路,Wang等^[27]结合光学偏振技术和阶梯光学元件开发出SS-FTOP,实现了4分幅超快成像,如图2所示。钛宝石超短激光器产生的中心波长为800 nm、脉宽为65 fs的激光脉冲由分束器分为泵浦光和探针光。泵浦光经光学延迟调节后,其偏振态经半波片转为垂直偏振。利用焦距为100 mm的透镜将泵浦光聚焦到10 mm厚的熔石英克尔介质中,其焦点距离介质输入面约1 mm。为避免泵浦光背景散射影响,采用BBO晶体将探针光倍频到400 nm。随后,探针光入射到4台阶阶梯光学元件上,阶梯元件将探针光分成空间区域不同、时序不同的4路子探针光,即利用阶梯元件对探针光完成了空间时序编码。4路子探针光垂直于泵浦光方向入射到由偏振片P1、熔石英介质(FS)和偏振片P2组成的克尔门上。偏振片P1偏振方向与偏振片P2相垂直,正常情况下无光到达探测器(CCD)。然而,泵浦光入射熔石英克尔介质引起的双折射(瞬态偏振变化)为探针光的传输提供了途径,使得部分探针光可以传输到CCD上。为记录瞬态图像,每一台阶产生1帧图像,须实现探针光和泵浦光在克尔介质中的时序同步。特殊设计的阶梯元件台阶宽度为0.54 mm,其对400 nm的探针光产生的时间延迟约0.96 ps,这一时间延迟须与800 nm泵浦光在熔石英

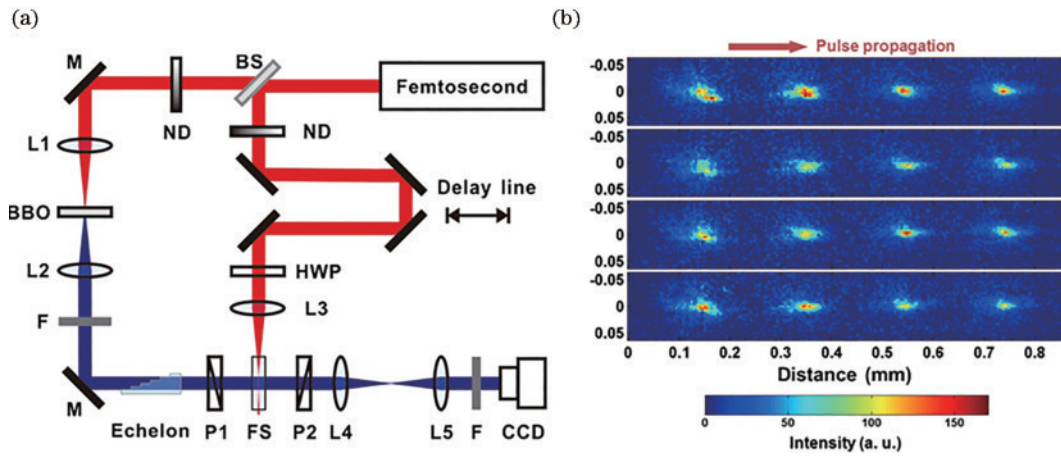


图 2 单发飞秒瞬态光学偏振测定术^[27]。(a)实验装置;(b)飞秒脉冲在熔石英介质中的传输过程

Fig. 2 Single-shot femtosecond time-resolved optical polarigraphy^[27]. (a) Experimental setup; (b) transmission process of femtosecond pulses in fused quartz medium

中的传播时间一致,因此台阶高度设计为 0.2 mm。如图 2(b)所示,利用 SS-FTOP 对飞秒脉冲在熔石英介质中的传输过程进行了连续 4 帧的超快成像,观察到了脉冲能量抖动引起的不同发次间泵浦光传输轮廓的演化。

由于熔石英介质的超快响应,SS-FTOP 的时间分辨率主要受限于探针光脉宽和泵浦光的横向尺寸 (~276 fs)。随着阿秒激光科学的进步,SS-FTOP 可以充分利用超短激光脉宽实现更快的时间分辨。然而,SS-FTOP 也有局限性。SS-FTOP 利用阶梯元件进行空间时序编码,考虑到阶梯元件规格,该方法采样帧数有限,时间量程较短,并且帧数与成像视场相冲突,空间分辨力较弱。

DLIF 可以实现激光脉冲自身传播过程的成像记录,也是一种典型的空间分割类单发超快光场成像技术^[32]。DLIF 的基本原理是:倾斜参考光(扫掠光)的脉冲前沿与不同时刻的物光(散射光)全息干涉记录在不同的空间区域,生成瞬态事件的时间分辨图像。如

图 3(a)所示,中心波长为 522 nm、脉宽为 178 fs 的超短激光脉冲由分束器分为照明光和参考光。照明光由透镜组准直扩束后,入射到装有明胶果冻的透明容器中,从明胶果冻中出射的照明光携带有三维散射信息,称为物光。另一路参考光经透镜组准直扩束后,入射到相位衍射光栅上,衍射光栅用来增加记录时间量程。从衍射光栅出射的参考光作为倾斜参考光。只有物光与参考光的光程差小于相干长度时,两束光脉冲才满足干涉条件完成全息记录。在记录过程中,由于参考光倾斜入射到图像传感器,参考光的脉冲前沿与物光相交于传感器横向的不同空间区域。换言之,图像传感器不同的空间区域记录了不同时刻的图像信息。最后,从获得的全息图中数字重建时间分辨图像。图 3(b)显示的是激光脉冲在三维散射介质中传播的运动过程,利用衍射光栅增加了总记录时间量程,采样帧数为 9 帧,图像间的时间分辨为 6.7 ps,总时间量程达 59 ps。DLIF 的时间分辨力主要由视场、入射角和相干长度决定。

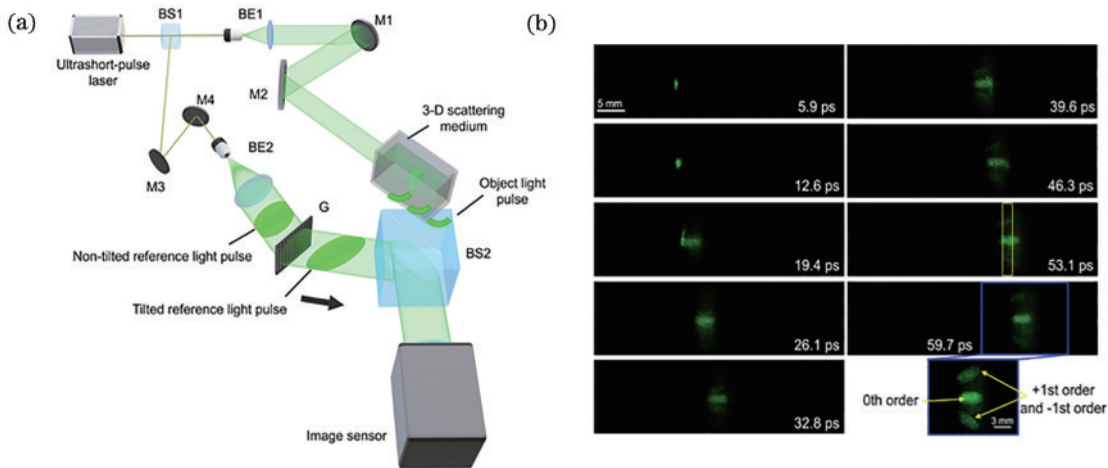


图 3 数字全息光飞行记录术^[32]。(a)实验装置;(b)激光脉冲在三维散射介质中的传输过程

Fig. 3 Digital light-in-flight recording by holography^[32]. (a) Experimental setup; (b) light pulse propagated in the 3D scattering medium

与 SS-FTOP 类似, DLIF 可以充分利用超短脉宽激光实现飞秒级的时间分辨力。DLIF 也有采样帧数有限且与成像视场成反比的缺陷,但是 DLIF 的视场在重建过程中是可调谐的,可以适当增加采样帧数。理论上,只要光源具备足够长的相干时间和足够大的散射角,DLIF 可以实现复杂超快现象的捕获。需指出的是,DLIF 是基于干涉原理的,仅可对相干光成像,不能用于观察非相干照明条件下的瞬态事件。

2.2 时间波长映射类

时间波长映射类方法主要利用啁啾超短脉冲的宽光谱作为编码载体,不同光谱成分与时间延迟间具有线性映射关系,啁啾脉冲光探测瞬态事件后,不同光谱成分的子脉冲光携带不同时刻的二维场景信息(x, y);在检测端,利用色散光学元件分离出不同时刻的探针光,获得瞬态演化信息(x, y, t)。时间波长映射思想广泛存在于各类单发超快成像技术中,这里主要介绍 3 种方法,包括时序全光摄影术(STAMP)^[28-29, 34-35]、瞬态光栅角色散分离术(ADSTG)^[36]和超快全光固态分幅相机(UASFC)^[37-38]。

东京大学的 Nakagawa 等^[28]开创了基于时间波长映射的 STAMP,其基本原理是基于波长编码子脉冲串,利用啁啾光和光栅形成时空扫描。如图 4(a)所示,STAMP 装置主要由超短光源、时间映射模块(TMD)、空间映射模块(SMD)及图像传感器等组成。飞秒量级的探针光经玻璃棒、棱镜对和光纤后,由于色散作用脉冲展宽到纳秒量级。基于空间光调制器(SLM)的脉冲整形器将具有连续光谱分布的纳秒探针光截断为光谱分离的子探针脉冲串。由于输入脉冲具有啁啾特性,不同光谱成分与时间延迟间具有线性映射关系,因此光谱分离的子探针脉冲串在时间上也是分离的。子探针脉冲串照射瞬态事件,随后被由衍射光栅和潜望镜阵列组成的空间映射模块色散分离到图像传感器上不同的区域。通过解构子探针脉冲串的时空分布,反演出瞬态事件。STAMP 可实现时间分辨为 190 fs、空间分辨为 450 pixel \times 450 pixel 的 6 分幅成像,实验中采用该技术研究了强激光诱导产生等离子体和晶格振动波传播等瞬态事件。

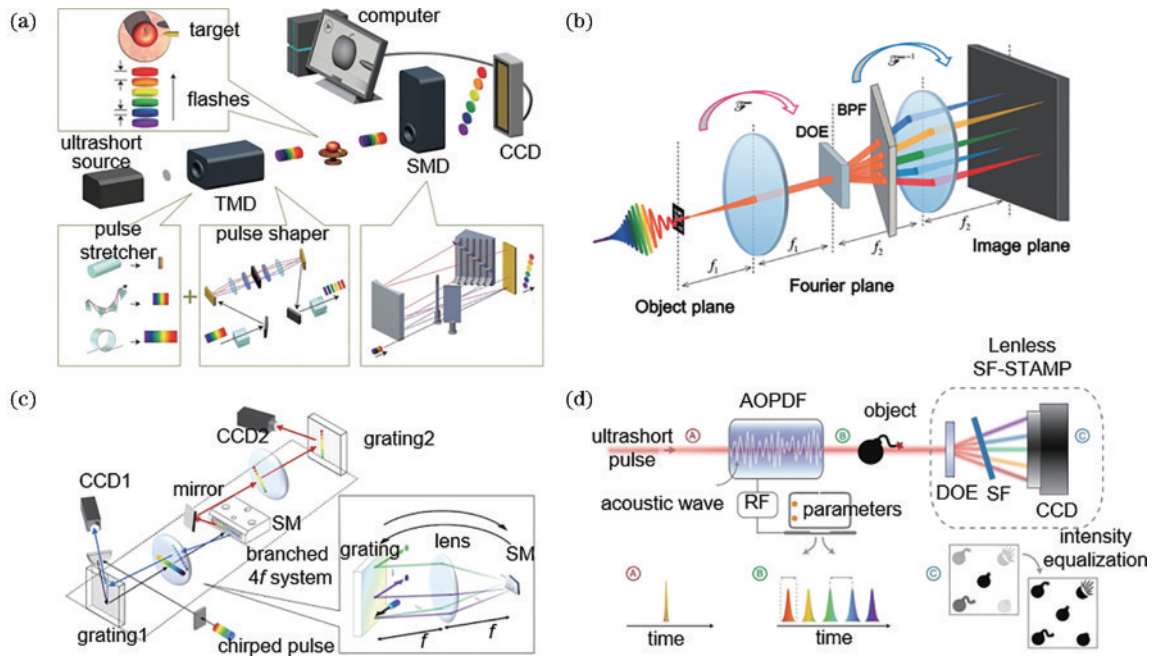


图 4 时序全光摄影术。(a)时序全光摄影术示意图^[28]; (b)光谱滤波-时序全光摄影术^[29]; (c)双路径分叉 4f-时序全光摄影术^[34]; (d)声光驱动无透镜光谱滤波-时序全光摄影术^[35]

Fig. 4 Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP). (a) Schematic of STAMP^[28]; (b) schematic of the SF-STAMP^[29]; (c) schematic of the branched 4f system for boosted STAMP^[34]; (d) schematic of acousto-optically driven lensless SF-STAMP^[35]

STAMP 实验装置构造复杂,其中脉冲整形和光谱色散组件较为繁琐。为简化系统设计,Suzuki 等^[29]和 Fan 等^[39]基于衍射光学元件(DOE)分束和带通滤波的方法发展出光谱滤波-时序全光摄影术(SF-STAMP)。如图 4(b)所示,SF-STAMP 利用 DOE 在空间上复制并分离出 25 路子探针光,不同角度出射的子探针光经窄带滤波器(BPF)得到滤波选通,成为光

谱分离的子探针光。由于输入脉冲的啁啾特性,不同光谱成分的子探针光携带不同时刻的瞬态事件信息。SF-STAMP 装置简洁灵活,极大地简化了系统结构,拓展了序列深度,实现了时间分辨为 133 fs 的 25 分幅成像。此外,Saiki 等^[34]通过在傅里叶频谱面放置阵列切面反射镜构建双路径分叉 4f 系统,对传统的 STAMP 装置进行升级,在保持空间分辨(450 pixel \times

450 pixel)不变的情况下将序列深度增加到 18 幅,如图 4(c)所示。其核心思路是通过两组共 18 个具有不同倾斜角度的切面反射镜将探针光分解为不同路径的子探针光,进而由 2 个 CCD 接收成像。为弥补 STAMP 分幅图像间强度的差异,2022 年 Touil 等^[35]结合声光可编程色散滤波器技术(AOPDF)、数字同轴全息技术(DIH)及 SF-STAMP,发展出声光驱动无透镜光谱滤波-时序全光摄影术(ADPDF-SF-STAMP),实现了 5 分幅等幅度成像,提升了 STAMP 的实用性,如图 4(d)所示。AOPDF 可以实现光谱和时间域的相位、幅度整形,因此可以独立控制曝光时间、帧速率和帧强度。DIH 技术可以实现无透镜操作,成像系统更加简单,同时可在宽景深上重建和定位物体。该方案简便灵活,实验中利用该技术分别在皮秒时间尺度上对光学克尔门进行成像和在纳秒时间尺度上对激光诱导烧蚀等进行成像。

2021 年, Xie 等^[36]利用瞬态光栅的角度和波长选择性实现了对微弱飞秒探针脉冲的时空分辨原位表征。两束泵浦光在介质中干涉形成瞬态光栅(体光栅),探针光以布拉格角入射时衍射效率最高,一级衍射信号出现在相位匹配方向上($k_1 - k_2 + k_3$),即瞬态光

栅具有角度和波长选择性^[40-41]。啁啾探针光的光谱成分与时间延迟具有线性映射关系,啁啾探针光入射到由两束泵浦光激发的瞬态光栅后将不同的空间角度衍射,在远场不同空间位置可以收集到不同时刻的光场信息。如图 5(a)所示,掺钛蓝宝石超短激光器发出的中心波长为 790 nm、脉宽为 50 fs 的激光脉冲由分束器分为泵浦光和探针光。利用 SLM 整形生成 2 束子泵浦光,通过高倍显微物镜,2 束子泵浦光在克尔介质干涉形成微米尺度(10~30 μm)的瞬态光栅。啁啾探针光入射到瞬态光栅上,为满足相位匹配条件,含有不同光谱成分的啁啾探针光将从不同的空间角度衍射,经高倍显微物镜和中继透镜传输成像在 CCD 相机上。由于空间角色散,不同时刻的光场信息在空间中分离,衍射信号提供了对探针光的时空分辨原位表征。图 5(b)显示了啁啾探针光经瞬态光栅后不同时刻光场的空间分离形态,这里瞬态光栅可以看作是一个具备时间选通作用的色散元件。图 5(c)为实验获得的不同时间延迟下的衍射信号。利用瞬态光栅的波长和角度选择性实现对啁啾探针光的时空表征是一种非常巧妙的方法,但是这种方法具有空间分辨(100 pixel \times 100 pixel)有限的缺陷。

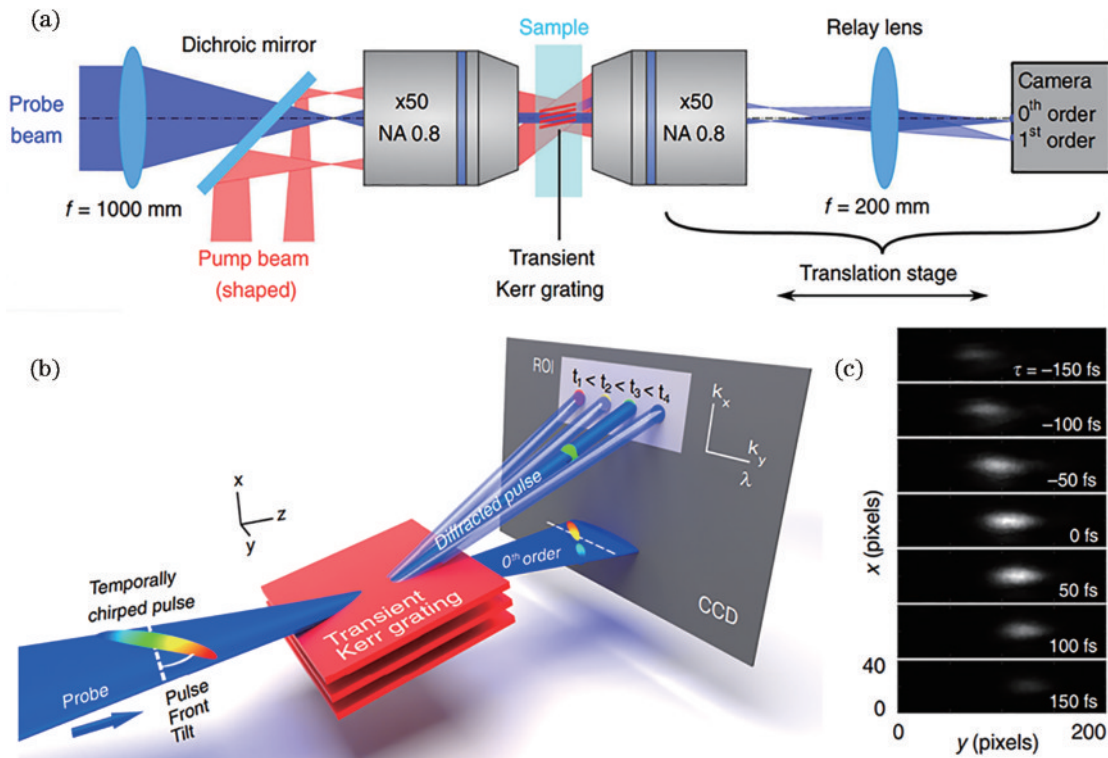


图 5 瞬态光栅角色散分离术^[36]。(a)实验装置;(b)瞬态光栅对啁啾探针光的衍射;(c)不同时刻的衍射信号

Fig. 5 Angular dispersion separation by the transient grating^[36]. (a) Experimental setup; (b) concept of the diffraction of an angularly dispersed probe pulse by the transient grating; (c) diffracted signal as a function of delay

Gao 等^[37-38]将时间-波长映射拓展为时间-波长偏振映射,基于超快半导体芯片的瞬态光折变效应研制出超快全光固态分幅相机(UASFC),实现了时间分辨为 3 ps、空间分辨为 30 lp/mm 的 6 分幅超快成像。如

图 6(a)所示,UASFC 主要由超快半导体芯片(USC)、时序映射模块(TSS)和空间映射模块(SMD)等组成。USC 将信号光信息传递到探针光上,TSS 对探针光的光谱域和偏振域进行时序编码,SMD 利用波分复用和

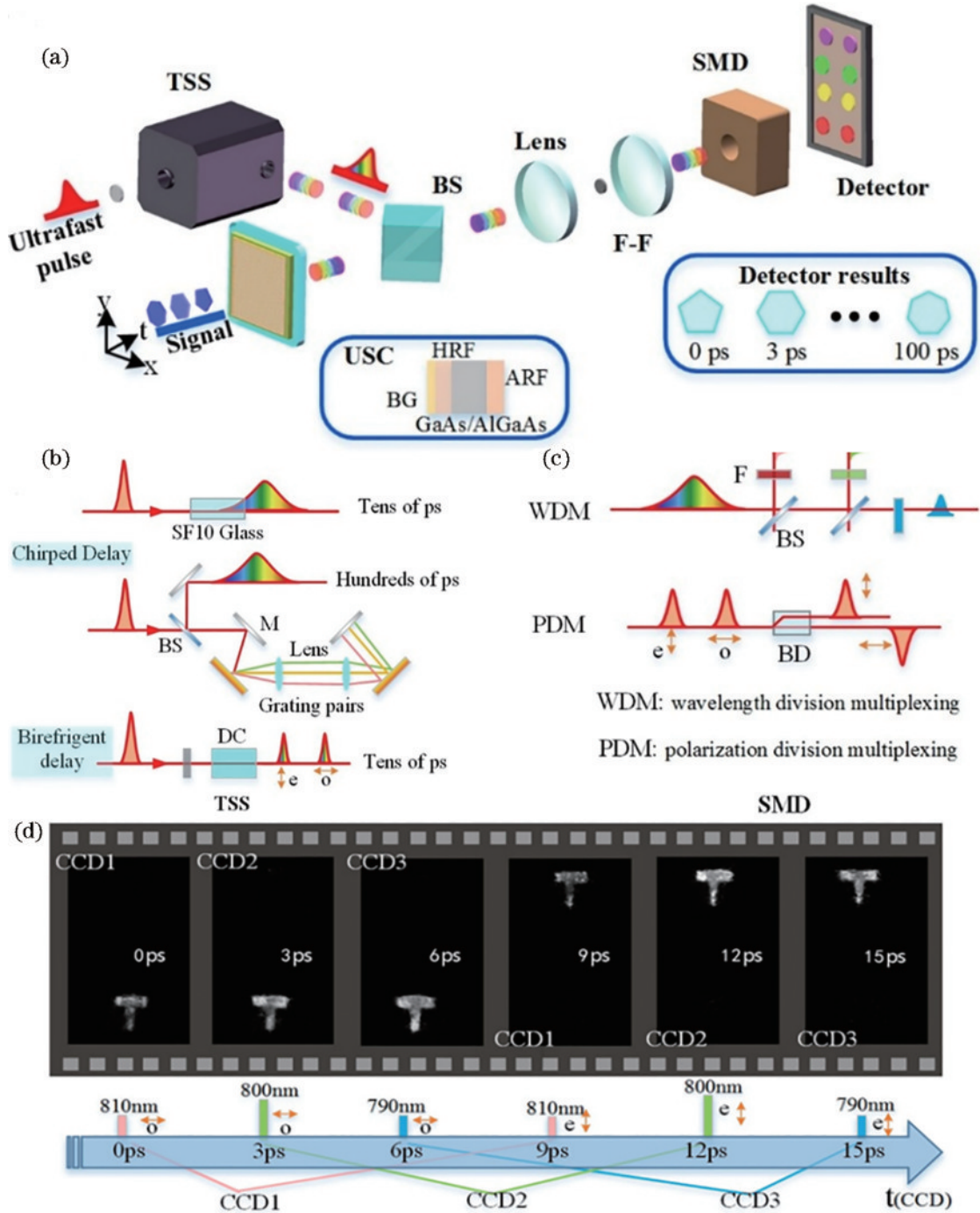


图 6 超快全光固态分幅相机^[37-38]。(a)基本原理;(b)时序映射模块;(c)空间映射模块;(d) 6分幅实验结果

Fig. 6 Ultrafast all-optical solid-state framing camera (UASFC)^[37-38]. (a) Principle of the UASFC; (b) TSS; (c) SMD; (d) experimental results of the UASFC's six framing images

偏振分复用技术将探针光时序映射到不同的空间区域。中心波长为 800 nm、脉宽为 50 fs 的超短脉冲由分束器分成信号光和探针光。首先,探针光入射到 TSS 上,由 SF10 色散玻璃和光栅对将脉宽展宽至数十 ps,由 TiO₂ 延迟晶体在探针光正交偏振间引入数十 ps 的相对延迟,使探针光的总记录时间增加到 100 ps 量级。信号光经 BBO 倍频后入射到 USC 上产生瞬态相位光栅效应,经色散展宽和偏振延时分离的探针光入射到瞬态相位光栅上附加相位信息。然后,利用 4f 系统对

探针光进行空间滤波,将探针光的相位变化转为振幅变化。SMD 由光束位移器(BD)、分束器和 3 个不同波段的窄带滤波器组成,其中 BD 在空间上分离出 2 个正交偏振的探针光,分束器和窄带滤波器将不同光谱成分的探针光成像到不同的 CCD 相机或单个 CCD 相机的不同空间区域。也就是说,波分复用(时间-波长映射)和偏振分复用(时间-偏振映射)构成了 SMD,将其探针光时序映射到不同的空间区域。图 6(d)是时间分辨为 3 ps 的 6 分幅超快成像结果,实验中采用了

3组滤波器和 CCD 相机,适当添加 CCD 相机和滤波器可增加采样帧数。UASFC 可实现光场演化行为的动态测量,其时间分辨由半导体的响应时间决定,采用 GaAs/AlGaAs 多量子阱可实现 2.5 ps 的最小时间分辨^[38]。结合前面所述的 SF-STAMP 技术对 UASFC 进行拓展,可实现数十甚至上百帧的分幅数。

时间波长映射类方法可实现百飞秒量级时间分辨的多帧超快成像,但是所获取的多幅图不在同一光谱基准,影响图像解读。此外,时间波长映射将初始啁啾超短脉冲编码为时间和光谱上分离的子脉冲串,子脉冲是初始飞秒脉冲完整光谱的一部分,由时间带宽积可知,窄脉宽与窄光谱不可兼得,导致时间分辨小于初始超短激光脉宽。

2.3 角度复用类

角度复用类方法以不同的角度探测记录瞬态事件,并结合其他技术解析出动态演化场景。目前主要有两种角度复用单发光学超快成像方法。第一种方法采用角度编码和时间分离的超短脉冲串探测瞬态事件,干涉记录形成角度复用全息图,全息图经频谱域处理得到瞬态事件,典型的代表技术是单发时频复用全息成像术(SS-TSFM)^[30]。第二种方法采用较长的激光脉冲记录整个瞬态事件的发生过程,不同角度的子

脉冲同时探测瞬态事件,每个子脉冲从不同的角度记录瞬态事件的投影。这里角度复用是为了实现计算层析重建,而不是时序编码。其时间分辨是通过时间波长映射和频域全息技术实现的。第二种方法典型的代表技术是单发频域层析术(SS-FDT)^[42-43]。

2020年, Moon 等^[30]利用 SLM 写入二维光栅的方式编码产生了多束不同角度的参考光,参考光经阶梯元件时间延迟后与携带待测信息的色散展宽探针光干涉记录,形成角度复用全息图。解析全息图,该方式实现了 14 分幅超快光学成像。如图 7 所示,中心波长为 800 nm、脉宽为 91 fs 的超短激光脉冲由多个分束器分为参考光、物光和探针光,分别由红色、紫色和青色标记。在 SLM 上写入二维衍射光栅图样,将参考光分束成不同角度传播的子参考光。在 L1 焦平面上放置不同厚度的阶梯元件,分别对每束子参考光进行光程延迟,相邻脉冲之间的时间延迟设置为 210 fs。14 束子参考光经透镜 L2、分束器 BS2 入射到相机。为了使系统紧凑简单,这里仅采用 1 束时间展宽的探针光而不是一系列超短脉冲串覆盖整个瞬态事件演化过程。91 fs 的探针光 2 次经过 5 mm 厚的 SF11 玻璃,色散展宽至 2.3 ps。物光泵浦激发样品后,色散展宽的探针光辐照样,携带瞬态事件信息后经 OL 等透镜成像

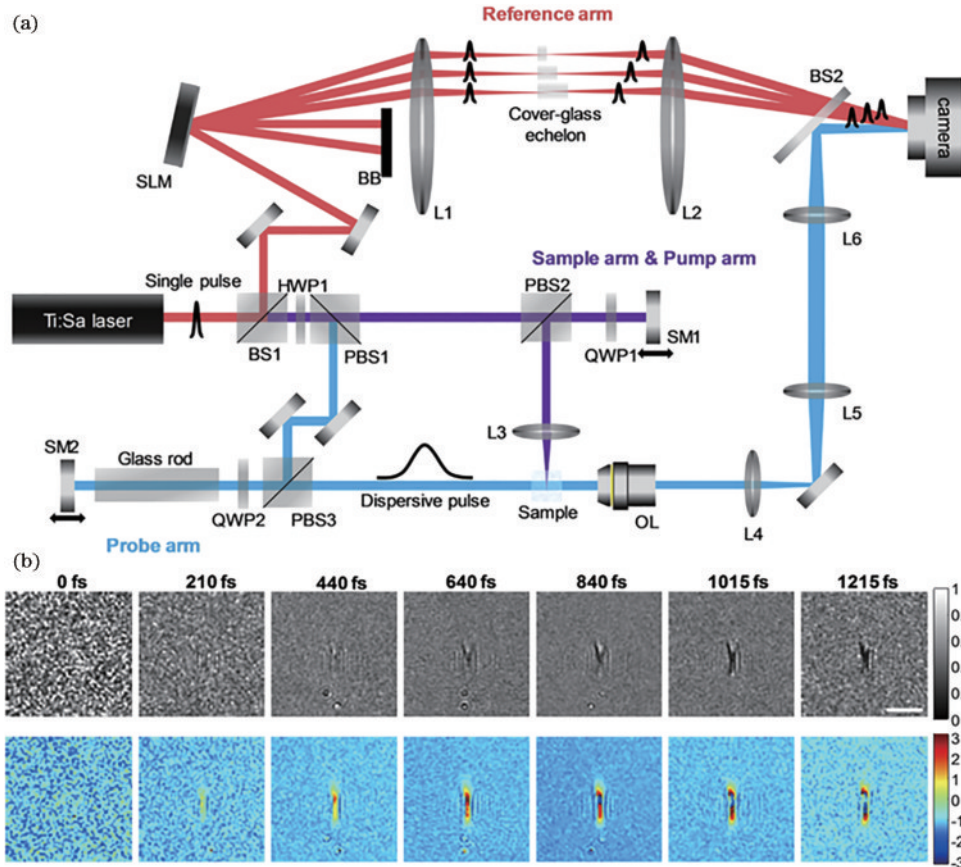


图 7 单发时频复用全息成像术^[30]。(a)实验装置;(b)强激光击穿空气产生等离子体的初始过程

Fig. 7 Single-shot time- and spatial-frequency multiplexing imaging holography^[30]. (a) Schematic diagram of the imaging setup; (b) initial process of generating a plasma string by the irradiation of a strong pump pulse in the air

到相机中。探针光与不同角度入射的参考光在相机中离轴干涉记录,形成时间和空间频域复用的全息图。在全息图中,不同角度的干涉条纹形成网状干涉图,在频谱面形成分离的空间频率边带,每一组边带对应不同时刻的图像信息,频域滤波后可获得每组条纹的复振幅信息。

实验中,采用 SS-TSFM 演示了光在散射介质中的传播、激光玻璃烧蚀、图 7(b) 所示强激光击穿空气产生等离子体等瞬态事件的超快成像。SS-TSFM 利用 SLM 和定制阶梯光学元件构成的独特光学布局突破了角度复用类方法采样帧数较少的缺陷(3~4 帧),实现了时间分辨为 210 fs 的 14 帧成像^[44]。如果降低单帧图像空间分辨力,可增加采样帧数,SS-TSFM 最高可实现 24 帧分幅成像,采样帧数的进一步提升受限于视场、系统放大率和物镜的数值孔径等几何参量。SS-TSFM 采用全息干涉的记录方式可以获得瞬态事件演化的复振幅信息,有利于完整分析超快演化现象。SS-TSFM 的时间分辨力受限于激光脉宽,采用更短波长的超快光源可实现更高的时间分辨,但是由于探针光色散展宽和阶梯元件规格限制,测量的时间量程有限。

结合角度复用和时间波长映射等方法, Li 等^[42-43]提出了一种能实现光场本身传输过程成像的单发频域层析术。如图 8 所示,两束同源的中心波长为 800 nm、脉宽为 30 fs 的探针光以小角度交叉入射到由 HZF4/BBO/HZF4 组成的三明治结构中。探针光穿过第一块 5 mm 厚的 HZF4 后,通过级联四波混频产生了 8 束波长为 800 nm 的子脉冲。厚度为 500 μm 的 I 类 BBO 将探针光倍频到 400 nm。第二块 15 mm 厚的 HZF4 玻璃将探针光展宽到 600 fs。实验中选择 5 个不同角度的探针子脉冲,透镜 L1 将第一块 HZF4 玻璃成像在 3 mm 厚的熔石英样品上,通过成像自动实现多路探针光在样品上的时空重合。由于泵浦光激发样品产生瞬态折射率结构,不同角度入射的探针光穿过样品将携带有不同方位的相位条纹信息。在这些探针光到达之前,从泵浦光中直接分离出的 1 束 400 nm 的啁啾参考光穿过样品,记录相位参考。5 路探针光和 1 束参考光同时入射到成像光谱仪的狭缝入口,在光谱仪内干涉,形成栅格状的频域全息图,如图 8(b) 所示。该全息图在单次拍摄中记录了 5 路探针光的相位调制信息,记录了瞬态事件的 5 个投影视图。

图像重建分为 3 步。首先,采用二维傅里叶变换获得全息图的空间频域信息,在空间频域,不同探针光因入射角度差异和时间延迟不同而分开,如图 8(c) 所示。其次,通过加窗、移频和傅里叶逆变换,获得不同探针光携带的折射率演化相位条纹信息,如图 8(d) 所示。最后,采用计算层析算法(如代数重建术)恢复出瞬态折射率演化结构。重建瞬态场景的时间分辨约为 2.4 ps,采样帧数为 60 帧,空间分辨为 128 pixel \times

128 pixel。图 8(e) 显示了熔石英介质在不同强度泵浦光激励下引起的非线性折射率演化。当泵浦光强度较低时,非线性折射率改变较小。当泵浦光强(0.7 μJ) 超过自聚焦阈值时,非线性折射率变化较大,脉冲在 7.4 ps 处产生自聚焦塌缩,在 9.8 ps 发生自聚焦成丝,从主光斑分离出旁瓣,在 12.2 ps 附近光束中心出现空洞,这表明强激光激发的等离子体诱导产生了一个负折射率变化,局部抵消了自聚焦效应产生的正折射率。

单发频域层析术中角度复用是为了实现计算层析重建,而不是时序编码。其时间分辨是通过时间波长映射和频域全息实现的。啁啾探针光和啁啾参考光进入成像光谱仪,在波长方向展开并干涉,形成频域全息图,通过啁啾脉冲的时间-波长映射关系得到时间分辨的相位条纹投影。单发频域层析术利用层析技术可获得较大的采样帧数,利用频域全息可记录复振幅信息,然而稀疏的角度采样将形成伪影,降低图像重建质量,进而限制了时空分辨能力。很多单发超快光场成像技术不是依靠单一的机制进行编码分离的,从上述内容可以看出,角度复用通常与全息等技术结合实现超快成像,角度在这里提供了一个维度以承载编码。

2.4 空间频率复用类

空间频率复用类方法的基本原理是:将不同的空间频率载波附加到具备不同时间延迟的超短探针脉冲串上,编码后的超短探针脉冲串照射瞬态事件后叠加成像到探测器上,在空间频域上不同的探针脉冲串因携带的载频不同而分离,经频域处理恢复瞬态事件(x, y, t)。目前主要有两种途径对超短探针脉冲串加载空间载频,即光栅调制附加载频和干涉附加载频。本节分别介绍基于光栅调制附加载频的多次曝光频域识别术(FRAME)^[31, 45-49]、多路复用结构光捕获术(MUSIC)^[50-52]和基于干涉附加载频的时间分辨全息偏振显微术(THPM)^[53]3 种技术,以期对这类方法有相对完整的认识。

2017 年, Ehn 等^[31]提出了基于空间频率复用的多次曝光频域识别术(FRAME),实现了时间分辨 200 fs 的 4 分幅成像测量,其核心原理是前级利用光栅调制编码超短探针光和后级空间频域识别解析。如图 9(a) 所示,中心波长为 800 nm、脉宽为 125 fs 的超短探针光经系列反射镜、分束器分为时序不同的 4 子束,子束探针光入射到不同方位的朗奇光栅上。利用周期相同(20 lp/mm)但方位不同的朗奇光栅分别对 4 子束探针光进行强度调制,然后 4 子束探针光经合束器同轴合束,经焦距为 150 mm 的成像透镜辐照瞬态事件,最后将其叠加成像到 CCD 上。虽然 CCD 上采集的图像在空间中是混叠的,如图 9(c) 和图 9(e) 所示,无法区别,但由于前级光栅编码,不同方位的空间载频将不同时刻的子束探针光在空间频域中分离,如图 9(b) 和图 9(d) 所示,没有任何串扰,经移频、滤波、傅里叶逆变换等频率解析操作可复原得到不同时刻的瞬态图

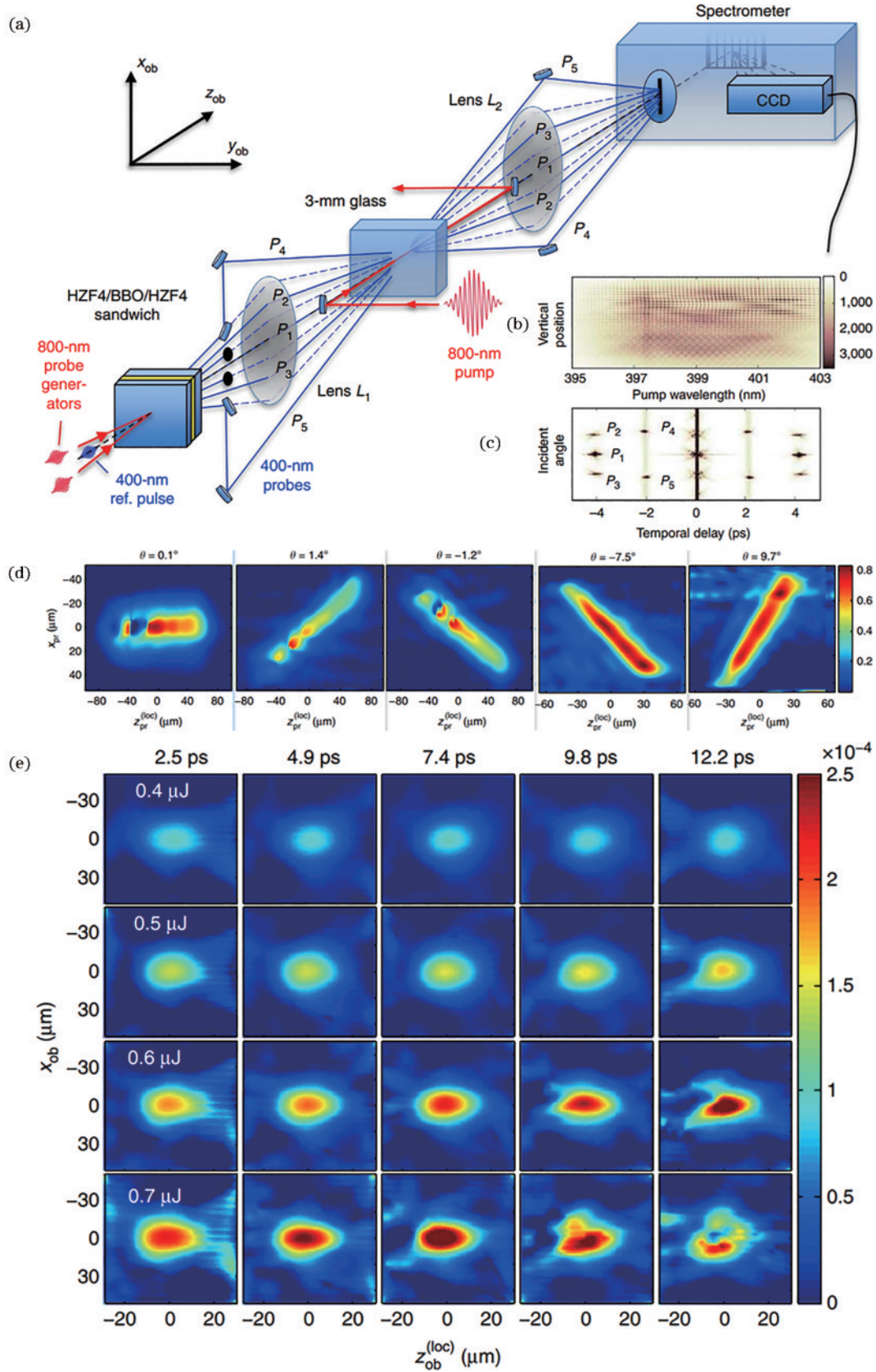


图 8 单发频域层析术^[42-43]。(a)实验装置;(b)频域全息图;(c)逆全息图;(d)瞬态折射率演化的相位条纹;(e)强激光脉冲诱导产生瞬态折射率的演化过程

Fig. 8 Single-shot frequency-domain tomography^[42-43]. (a) Schematic of the experimental setup; (b) 2D frequency-domain hologram; (c) reciprocal 2D hologram; (d) phase streaks induced by the evolving index profile; (e) evolution process of transient refractive index induced by strong laser pulses

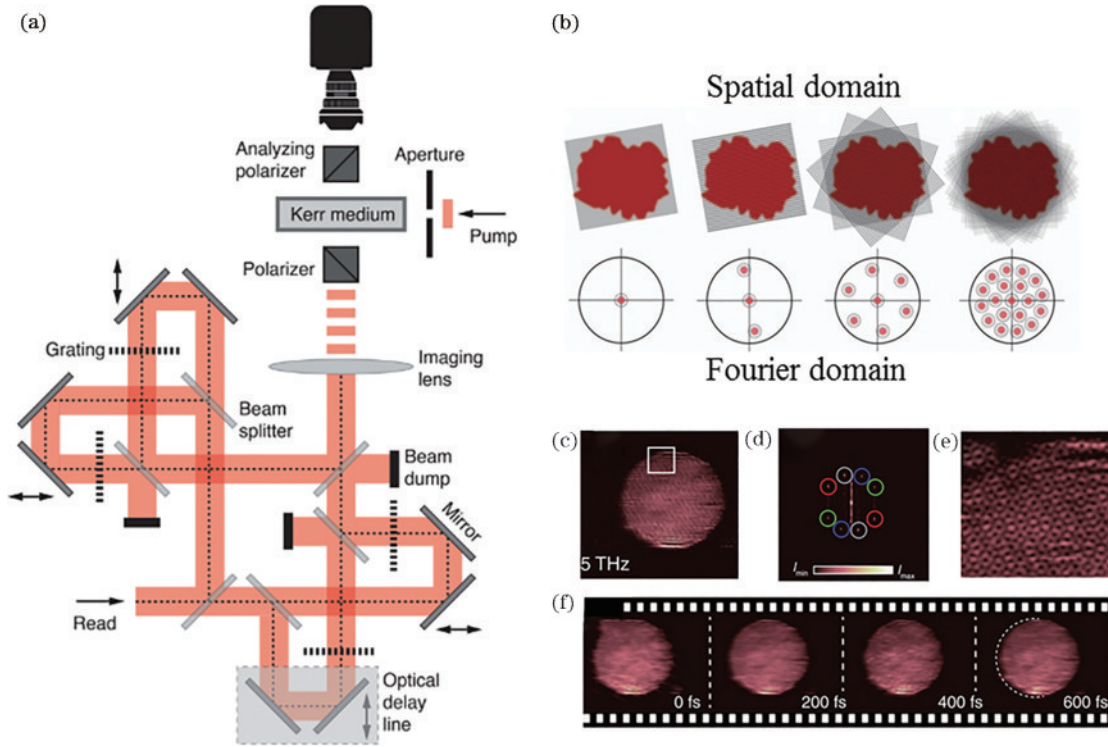


图 9 多次曝光频域识别术^[31]。(a)实验装置;(b)基本原理;(c) CCD 采集的原始图像;(d)图 9(c)的傅里叶频域;(e)图 9(c)方形区域的放大图;(f) 4 分幅实验结果

Fig. 9 Frequency recognition algorithm for multiple exposures (FRAME)^[31]. (a) Experimental setup; (b) operating principle of FRAME; (c) raw image obtained by CCD; (d) 2D Fourier transform of Fig. 9(c); (e) magnified view in square area of Fig. 9(c); (f) four framing images

像。图 9(f)为采用 FRAME 捕获的飞秒脉冲在 CS₂ 介质中的传输过程,其时间分辨为 200 fs,空间分辨为 1002 pixel×1004 pixel,可以清晰地观察到飞秒脉冲的纵向演化过程。FRAME 装置是基于像传递原理的,各子束光栅放置的位置与 CCD 像面的距离相等,消除了宽带啁啾光带来的色散影响,不受特定波长的限制,因此具备全光谱成像兼容能力。FRAME 可拓展性强,采用不同脉宽的光源作为探针光,可在不同时间尺度(as~ms)成像,采用低噪声高敏感 CCD 可进一步提升成像质量^[46-47, 49, 54]。

2018 年,Gragston 等^[50]基于空间频率复用原理提出了多路复用结构光捕获术(MUSIC),实现了时间分辨为 1 ns 的 3 分幅成像。MUSIC 利用空间频率移动对瞬态事件的时间演化过程进行编码,每一个频率移动对应一个独特的时间,经频域解析获得不同时刻的场景图像。不同于 FRAME, MUSIC 不需要使用超短脉冲作为探针光,其时间分辨的实现是依靠各子束的延迟时间不同和窄门宽选通相机的。如图 10 所示, MUSIC 装置主要由光程延迟、光栅编码和时间选通 3 部分组成。照明光辐照瞬态事件,探针光对瞬态事件进行成像测量。探针光经分束器和反射镜组分为光程不同的 3 子束,各子束间的光程差为 30 cm,对应时间延迟约 1 ns。各子束利用不同方位的朗奇光栅(10 lp/mm)进行空间频率编码,同轴合束后进入窄门宽选通相机

(PI-Max 4 ICCD)。PI-Max 4 ICCD 为像增强相机,其最小曝光时间为 3 ns。3 ns 门宽的 ICCD 截断各子束的成像积分时间,第 1 路记录整个瞬态事件,第 2 路记录前 2/3 事件,第 3 路记录前 1/3 事件,总时间量程为相机的曝光时间。实验中,利用 MUSIC 装置观察到了激光诱导电离、相干微波散射等瞬态事件。MUSIC 装置利用空间频域解析和窄门宽相机实现了多分幅相机的功能,进一步减小各子束的光程差,并选用更短门宽的 CCD 实现更高的时间分辨。MUSIC 装置不需要依赖超短脉冲作为探针光,装置设计较巧妙,但是需要图像相减才能分离出不同时刻的图像信息,可能存在混叠现象^[55]。

Yue 等^[53]提出了基于干涉附加载频的时间分辨全息偏振显微术(THPM),实现了偏振敏感材料中瞬态事件的超快成像。如图 11 所示,中心波长为 1064 nm、脉宽为 30 ps 的超快光源由分束器 BS1 分为泵浦光和探针光。泵浦光经透镜 L1 聚焦辐照样品激发瞬态事件,线偏振探针光经 KDP 晶体倍频后由 1/4 波片转为左旋圆偏振光。然后,圆偏振探针光经偏振分束器 BS2 分为 2 子束,通过延迟线 DL1 调节 2 子束的时间延迟。2 子束探针光分别经过呈 45°排列的二维正交光栅(CG1 和 CG2)得到空间频率编码,然后由偏振分束器 BS3 分为物光和参考光。物光光路中,设置 PF1 针孔滤波器选通光栅衍射的 2 束零级光,2 束物光经与

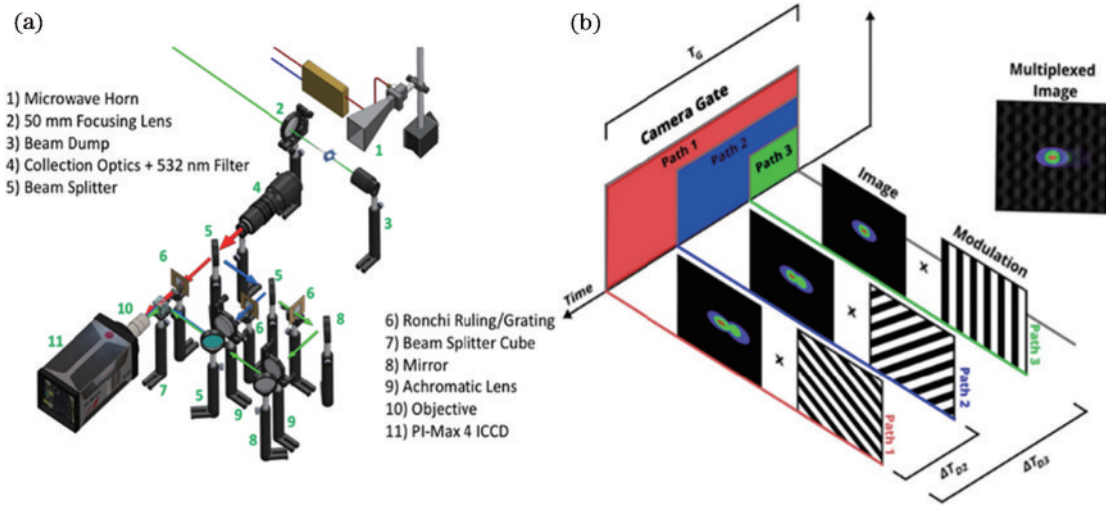


图 10 多路复用结构光捕获术^[50]。(a)实验装置;(b)工作原理示意图

Fig. 10 Multiplexed structured image capture (MUSIC)^[50]. (a) Experimental setup; (b) operating principle of MUSIC

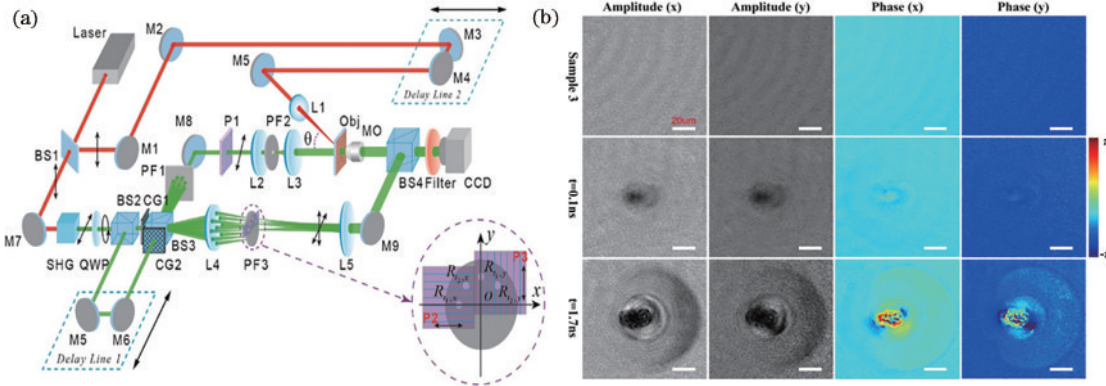


图 11 时间分辨全息偏振显微术^[53]。(a)实验装置;(b)超快激光诱导云母片损伤的时间分辨复振幅信息

Fig. 11 Time-resolved holographic polarization microscopy (THPM)^[53]. (a) Experimental setup; (b) time-resolved amplitude and phase contrast imaging of ultrafast laser-induced damage in a mica lamina sample

水平方向呈 45° 放置的偏振片 P1 后照射由泵浦光激发的瞬态事件。在参考光路中,设置 4 孔滤波器 PF3 并在 PF3 后紧贴放置正交偏振的偏振片 P2/P3,如图 11(a) 右下角所示,其中 P2 呈水平偏振, P3 呈垂直偏振。4 孔滤波器 PF3 和偏振片组分别选通光栅 CG1/CG2 中的一级衍射中的两组正交偏振光,产生了 4 束子参考脉冲 $(R_{t_1,x}, R_{t_2,x}, R_{t_1,y}, R_{t_2,y})$, 每子束参考脉冲具有不同的时序和偏振态。最后,呈 45° 偏振的 2 束物光和 4 束参考光经偏振合束器 BS4 合束后入射到 CCD 中干涉记录,形成频率复用全息图。实验中,2 个探针光之间的时间延迟需要大于单个脉冲的持续时间,因此物光各正交偏振分量只能和来自同一个探针光的参考光的正交偏振分量发生干涉。由于前级二维光栅空间频率编码,物光与 4 个子束参考光的干涉条纹具有不同的空间频率,在空间频域对全息图进行处理可以复原瞬态事件。图 11(b) 为超快激光诱导云母片损伤过程的实时成像,在强光辐照数百皮秒后,可以看到冲击波的产生,由于云母片的各向异性,光场振幅和相位发生了不均匀的变化。THPM 装置设计巧妙,

利用二维光栅复合编码,滤波器小孔和偏振态的优化设计获得了瞬态事件在 2 个不同时刻正交偏振态下的复振幅信息。相比其他空间频率复用类方法,THPM 尤其适合于监测偏振敏感材料中的超快现象,但是目前该技术采样帧数有限。

空间频率复用类的单发超快光场成像技术不受限于特定波长,不依赖于色散,不牺牲超短脉冲的时间分辨力,可以保留探针光的全部光谱信息,因此具备全光谱兼容能力,可以应用到众多激光与物质相互作用现象的分析中。空间载频可以通过光栅强度调制或者干涉调制的形式附加。前者适用于各种类型的超短光源,如纳秒脉冲或 LED 光源,并且可以拓展到偏振、光谱和焦深等维度,实现多维度复合成像^[45-47, 56-57]。后者可以获得瞬态事件的复振幅信息。与空间分割类方法类似,空间频率复用法同样存在采样帧数有限的问题,采样帧数与成像视场或者空间分辨率冲突。

2.5 光束触发快门类

光束触发快门类方法是利用超短激光脉冲本身的短脉宽作为触发快门去截断瞬态事件的。这类方法原

理新奇,构思巧妙,基本上都利用了空间分割的思路,但是该类技术最突出的特征是超短激光本身作为时间快门选通瞬态事件,这里对其进行单独分析以突出其重要性。本小节分别介绍基于并行结构相干快门原理的全光同轴分幅相机(AOCFP)^[58-59]和基于非共线光学参量放大原理的全光超快高时空分辨成像系统(FINCOPA)^[60]。

Chen等^[58]研制了基于并行结构相干快门原理的全光同轴分幅相机(AOCFP),在同一空间、时间和光谱基准下获得了时间分辨为34 ps的4分幅超快成像。如图12所示,AOCFP主要由脉冲串产生单元和并行结构相干快门单元组成,中心波长为527 nm、脉宽为10 ps的调Q锁模光源经分束器分为探针光和参考光。探针光经系列反射镜、分束器和标准具组成的脉冲串产生单元后转为4束同轴的探针光脉冲串,其中标准具用于调节子束间的时间延迟。探针脉冲串辐照瞬态事件后进入并行结构相干快门单元。在并行结构相干快门单元内,系列分束器将探针脉冲串分成4路沿不同路径传播的子探针脉冲串,同时另一系列分束器将

参考光分成4束沿不同路径传播的子参考光。不同路径的子参考光只与子探针脉冲串中的1束在时间上重叠,满足相干条件,从而仅产生与这1束子探针脉冲干涉的图,其余子探针脉冲以非相干本底的形式存在。这里,利用子参考光选通探针光特定时刻的复振幅信息,控制干涉条纹的产生与关闭,子参考光起到相干快门的作用。不同时序的子参考光选通不同的子探针光,到达同一个CCD(尺寸为49 mm×36.8 mm,分辨率为3735 dpi)的不同区域。通过并行结构相干快门和空间分割,每一个干涉全息图在空间上和时间上都是独立的。实验中,利用AOCFP观察了激光击穿空气和激光加载铝箔两种超快物理过程。AOCFP中相干快门的曝光时间取决于探针光和参考光中的最小脉宽,采样间隔取决于探针光脉冲的时间延迟,采用更短的激光脉冲可以实现更高的时间分辨^[59]。不同于其他类型单发超快成像方法,AOCFP采用非复用的记录方式,多幅干涉全息图在空间上是完全分离的,消除了图像间的串扰,同时可以充分利用系统的空间带宽,空间分辨上限极高。此外,AOCFP采用同轴干涉分幅

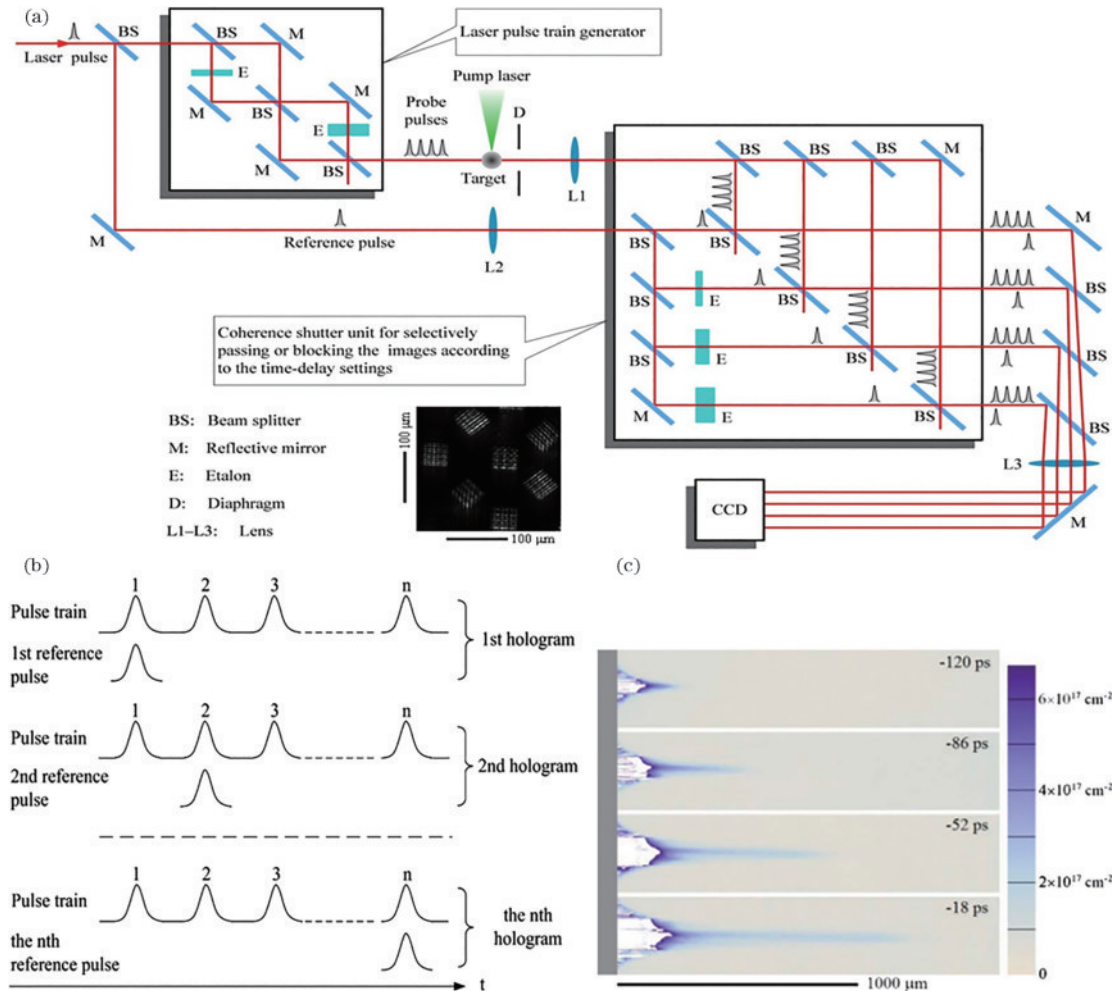


图 12 全光同轴分幅摄影术^[58]。(a)实验装置;(b)并行结构相干快门工作原理;(c)激光加载铝箔电子面密度分布

Fig. 12 All-optical coaxial framing photography^[58]. (a) Experimental setup; (b) principle of the parallel coherence shutters; (c) maps of electron areal density generated by laser driving aluminum foil

成像方式,不仅保持各幅图像在同一空间和光谱基准,还可以获得复振幅信息。但是,AOCFP分合束光路较复杂,随着分幅数的提升,所需的光学元件数量大幅度提升,难以实现更高的采样帧数。

Zeng 等^[60]基于飞秒激光脉冲泵浦和级联非共线光学参量放大(NCOPA)研制了全光超快高时空分辨成像系统(FINCOPA),实现了时间分辨为 50 fs、空间分辨为 83 lp/mm 的 4 分幅超快成像。如图 13(a)所示,FINCOPA 采用啁啾长脉冲光作为探针辐照瞬态事件,利用级联的强泵浦光分别对啁啾长探针光的某一时间片段信息进行光学参量放大,将探针光的某一时间片段信息传递到闲频光上,由不同的 CCD 接收进而实现分幅成像。这里 OPA 相当于像转换器,由于闲频光仅当泵浦光和探针光在时间重叠时才产生,超短脉宽泵浦光发挥了时间触发快门的作用。采用非共线模式的 OPA,可以实现闲频光、探针光和泵浦光的空间分离。如图 13(b)所示,中心波长为 800 nm、脉宽为 40 fs 的激光脉冲经 BBO 倍频后,约 30% 的激光波长转换为 400 nm。波长分离器(WS)透射 400 nm 波长光,反射 800 nm 波长光。透射的 400 nm 激光脉冲经分束器组(BSG)分为 4 子束,用作 OPA 的泵浦光,通过延迟线

(DL)调节各子束间的时间延迟。反射的 800 nm 激光脉冲经分束器(BS)分为探针光和激发光,探针光经光栅色散展宽到 50 ps,激发光用于激发瞬态事件。长啁啾探针光辐照瞬态事件后,传输到级联 OPA 中,由不同时序的泵浦光选通探针光的不同时间片段,实现分幅成像。实验中,利用 FINCOPA 相机对等离子体光栅和超快旋转光场实现高达 15 Tframe/s 采样频率、50 fs 时间分辨的高空间分辨超快成像。FINCOPA 构思巧妙,利用 OPA 过程记录瞬态事件,控制泵浦光与探针光的时序实现场景片段的提取。采样帧数由 OPA 的级数决定,采样频率可由各级 OPA 的相对延迟得到灵活调整。时间分辨取决于触发 OPA 的泵浦光脉宽和放大增益,增益越高,等效曝光时间越短^[61]。空间分辨主要由光参量放大器和成像系统的空间带宽决定,成像过程中没有器件移动,动态空间分辨等价于静态分辨。由上述内容可以看出,时间分辨、空间分辨、采样帧数和采样频率不存在相互制约的情况,FINCOPA 相机可拓展性强。然而,受限于激光系统输出功率和光路结构配置,FINCOPA 难以实现数十帧的分幅数。类似于时间波长映射类方法,FINCOPA 所获取的多幅图像不是同一光谱基准,不适应于非啁啾光。

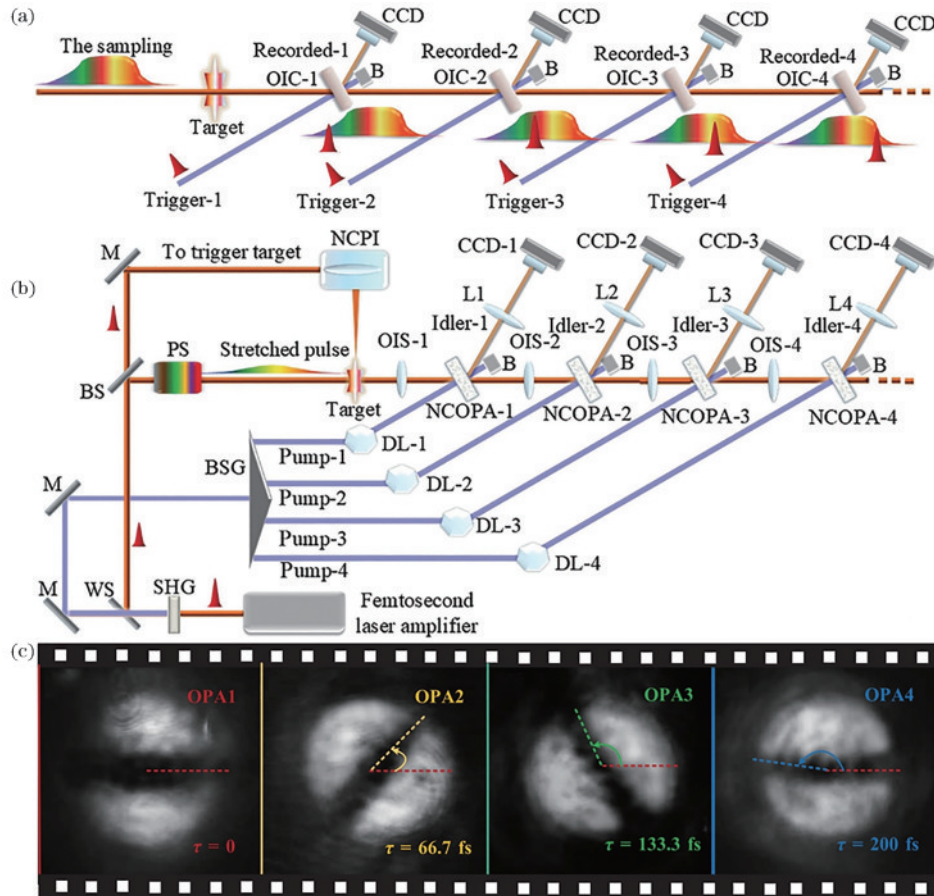


图 13 全光超快高时空分辨成像系统^[60]。(a)工作原理示意图;(b)实验装置;(c)超快旋转光场的 4 分幅成像

Fig. 13 All-optical ultra-fast high spatiotemporal resolution imaging system (FINCOPA)^[60]. (a) Schematic diagram of FINCOPA; (b) experimental setup of FINCOPA; (c) four framing images of the ultrafast rotating optical field

光束触发快门类方法利用超短激光本身作为触发快门实现对多帧图像的非复用记录,可以保持非常强的时间分辨能力,同时不牺牲空间分辨力。但是,光束触发快门类方法的采样帧数与系统复杂程度成正比,难以实现数十帧的分幅数。

通过分析可以发现,多数单发超快光学成像技术不仅利用了一种机制,而且充分利用了空间、角度、波长、偏振、空间频率等多维度信息,借助各种线性或者非线性光学效应实现超快成像。这些单发超快光学成像技术构思巧妙,特征突出,推动了各类超快动态现象的研究,不断拓展人类观察未知的边界。

3 被动式单发超快光场成像技术

被动式探测类方法不对光信息进行直接调制,不需要主动照明,由超快光电探测器实现超快时间分辨。与主动式探测方法相比,被动式探测方法在自发光和宽光谱成像场景中具备独特优势,可分为超快探测器直接探测类和图像重建类。

超快光场探测器主要有基于快电子学原理的分幅相机^[62-63]、高速取样相机^[64]和原位存储电子快门相机^[23, 65-68]等。其中,微通道板(MCP)行波选通型分幅相机发展相对成熟,其基本原理是控制脉宽极窄的电脉冲选通并放大不同时刻的图像。国际上,斯坦福计算光学公司研制的超高速分幅相机可实现最小门宽 200 ps^[62]。国内西安中智科仪公司研制的“逐光”分幅相机可实现最小门宽 500 ps^[63]。虽然 MCP 分幅相机能够提供二维时间分辨信息,但是存在动态范围有限、增益误差、校准

复杂和红外波段光谱响应困难等诸多限制^[69]。此外,在单一视线范围内,MCP分幅相机只能提供 1 帧图像。高速取样相机借助条纹相机实现超高的时间分辨,但其空间分辨力较低,实用性偏弱,这里不再展开。

Hart 等^[23]、Hurd 等^[66]和 Lanier 等^[70]在美国国家点火装置(NIF)部署了 Icarus-2 hCMOS 原位存储电子快门相机,开展了含时分辨高功率光场演化规律研究,实现了最小门宽 1 ns 的 4 分幅成像。Icarus-2 相机是由美国圣地亚实验室(SNL)研制的,具备 4 帧触发功能,4 幅图来自同一视场,各幅之间无视角差,可对从 X 射线到红外波段的信息进行成像^[23, 71]。相机具有 1024×512 的像素阵列和 $25 \mu\text{m}$ 的空间分辨率,动态范围可达 2000:1。曝光模式的 Icarus 相机所采用的核心器件包括金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)开关、光电二极管像素阵列(PPD)和读出集成电路(ROIC)等。Icarus 相机使用 MOSFET 开关作为电子快门在纳秒时间尺度上捕获多帧图像,并将多帧图像信息原位存储在 PPD 内的存储元件上,然后在较慢的时间尺度上读取多帧图像信息。具体地,在外部触发下,Icarus 相机产生 4 个预编程的高速快门脉冲并将快门脉冲分配到 PPD,每一个 PPD 中的像素产生的电子空穴对通过一系列电容在每一个像素中得到原位收集和存储,这样将在纳秒时间尺度上以像素为单位存储多个帧。最后,在图像捕获后约 200 ms,由 PPD 直接耦合的 ROIC 读出多帧图像。如图 14 所示,实验中采用 Icarus 相机研究了 NIF 中整形激光脉冲的时空耦合问题,发现不同时刻的高功率激光近场分布存

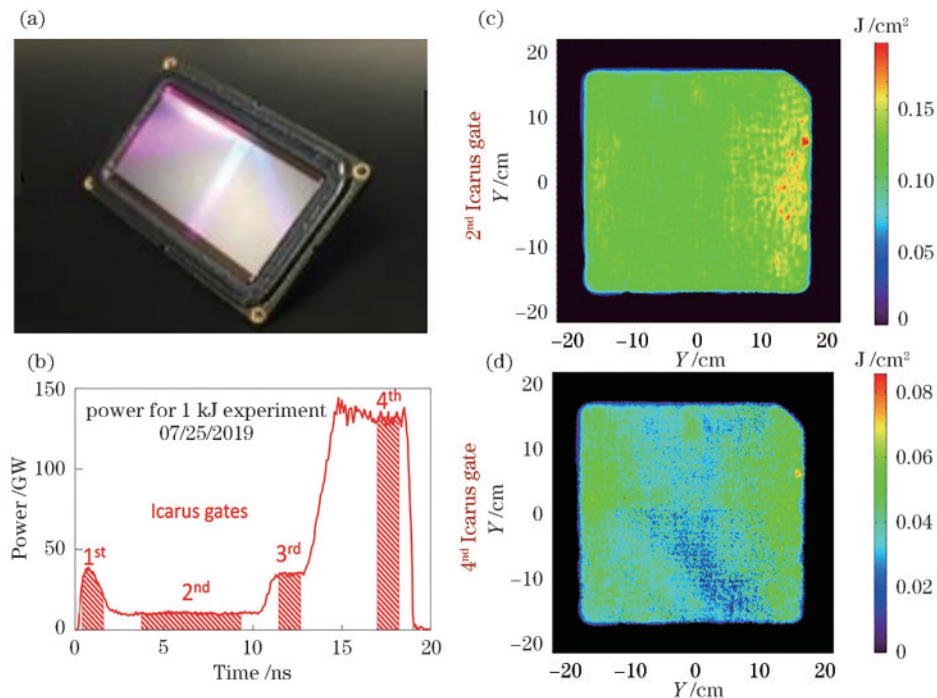


图 14 Icarus 电子快门相机^[66]。(a)相机实物图;(b)激光波形;(c)时间片段 2 的光束近场;(d)时间片段 4 的光束近场
Fig. 14 Icarus hCMOS imager^[66]. (a) Photograph of Icarus hCMOS imager; (b) laser waveform; (c) time-gated beam profile in temporal slice 2; (d) time-gated beam profile in temporal slice 4

在差异,展示了存在于光场局域的突变点。Icarus 相机成功应用于系列高能量密度物理实验,实现了 1 ns 时间分辨的 4 分幅超快现象成像,是目前实用程度最高的超快光学成像仪器之一。在 Icarus 相机中,帧数由给定像素空间中可以容纳的存储元件的数量决定,由于加工工艺限制,采样帧数难以突破数十帧。此外,原位存储相机受限于半导体体系,其最小门宽难以突破亚纳秒级,无法实现更细微时间尺度上物理现象的表征。

图像重建类主要包括压缩超快成像和多孔径压缩感知成像等^[25-26, 72-75]。这类基于压缩感知理论的方法可以从欠采样的稀疏数据中恢复重构出瞬态场景。例如,单通道超快压缩成像技术利用狭缝完全打开的条纹相机扫描记录编码信息,利用重构算法,迭代获得时变的各幅二维图像^[25]。然而,这类方法要求测量对象必须具备稀疏性,重建方案较复杂,实时性较差,难以实现大画幅、高空间分辨测量。压缩成像将高维数据压缩映射到较低维度,有利于将三维光场信息投影到二维探测器上,借助高时间分辨的条纹相机可以实现超快成像,因其在成像程度和序列深度等方面的独特优势,近年来发展迅猛。篇幅有限,有关压缩感知的详细综述可以参考文献^[72, 76-77]。

4 总结与展望

根据照明方式的不同,将单发超快光场成像技术分为主动式探测和被动式探测两大类。主动式探测类方法通常采用超短脉冲串作为探针基元进行瞬态事件测量,并在空间、波长、角度、偏振或空间频率等维度进行主动编码。被动式探测类方法不对探针光进行编码,通常借助超快探测器和先进算法等实现超快光学成像。本文从基本原理、应用、优势和局限性等方面综述了 15 种主动式探测类方法和 1 种被动式探测类方法。表 1 从空间分辨、时间分辨、采样帧数、优劣势以及应用场景等多角度对比分析了 16 种单发超快光场成像技术的差异。

主动式探测类方法可以进一步分为:空间分割、时间波长映射、角度复用、空间频率复用和光束触发快门等。多数单发超快光场成像技术不是依靠单一的机制进行时间分辨测量的。空间分割思路广泛存在于各类单发超快光场成像技术中,空间分割特征较为突出的技术主要有 SS-FTOP 和 DLIF。在仅使用单一成像器件的情况下,空间分割类方法的采样帧数与成像视场相冲突,空间分辨力偏弱,如 SS-FTOP 的成像范围仅 $41 \text{ pixel} \times 60 \text{ pixel}$;如果使用多个成像器件,将增加系统复杂度。SS-FTOP 可以对高功率激光在介质中的非线性传输演化过程进行超快成像;DLIF 可以实现激光脉冲自身传播过程的成像记录,但是由于 DLIF 是基于干涉原理的,仅可对相干光成像,不能用于观察非相干照明条件下的瞬态事件。

时间波长映射类方法主要利用啁啾超短脉冲的宽光谱作为编码载体,不同光谱成分与时间延迟间具有线性映射关系,主要技术包括 STAMP、ADSTG 和 UASFC。近年来,STAMP 迭代较快,SF-STAMP 和 4f-STAMP 结合 DOE 衍射分束、光谱窄带滤波和阵列切面反射镜等技术将传统 STAMP 的采样帧数由 4 帧分别增加到 25 帧和 18 帧,同时简化了系统设计。ADPDF-SF-STAMP 作为该类技术的集大成者,利用 AOPDF 对光谱域和时间域的相位幅度进行整形,实现了曝光时间、帧速率和帧强度的独立控制,实现了无透镜 5 分幅等幅度成像,进一步提升了 STAMP 类方法的实用性。STAMP 类方法可以应用于强激光诱导产生等离子体、晶格振动波传播、光学克尔门演化、晶体相变、激光诱导烧蚀等瞬态事件的研究表征。ADSTG 利用瞬态光栅的角度和波长选择性实现了对啁啾光本身的时空表征,时间分辨力较高,但是存在空间分辨有限的缺陷。UASFC 将时间-波长映射拓展为时间-波长偏振映射,拓展了采样帧数,其最小时间分辨力取决于半导体的响应,可以实现光场演化行为的动态测量。如果进一步结合 SF-STAMP 对 UASFC 进行拓展,优化设计后可实现数十帧的采样。时间波长映射类方法可实现百飞秒量级时间分辨的多帧超快成像,但是所获取的多幅图不在同一光谱基准,影响图像解读。

角度复用类方法以不同的角度探测记录瞬态事件,并结合其他技术解析出动态演化场景,代表技术有 SS-TSFM 和 SS-FDT。SS-TSFM 通过不同角度的探针光与参考光干涉记录形成角度复用全息图,经频域解析恢复瞬态事件,可以获得复振幅信息,其空间分辨力较高,有利于完整分析超快演化现象。SS-TSFM 利用 SLM 和定制阶梯光学元件构成的独特光学布局,突破了角度复用类方法采样帧数较少的缺陷,实现了时间分辨为 210 fs 的 14 帧成像,演示了光在散射介质中的传播、激光玻璃烧蚀和强激光击穿空气产生等离子体等瞬态事件的超快成像。在 SS-FDT 中,不同角度的子脉冲从不同的角度记录瞬态事件的投影,角度复用是为了实现计算层析重建。重建瞬态场景的时间分辨约为 2.4 ps,然而稀疏的角度采样将形成伪影,降低图像成像质量。采用 SS-FDT 可以研究强激光非线性传输的演化过程,解析出瞬态折射率演化,为阐明强激光与物质相互作用的物理机制奠定基础。可见,角度复用通常与全息等技术结合实现超快成像,角度在这里提供了一个维度以承载编码。

空间频率复用类方法是将不同的空间频率载波附加到具备不同时间延迟的探针脉冲串上的,主要有光栅调制附加载频和干涉附加载频 2 种方式,代表技术包括 FRAME、MUSIC 和 THPM。FRAME 在前级利用光栅调制编码超短探针光,在后级空间频域识别解析出瞬态事件。FRAME 基于像传递原理,消除了宽度啁啾光带来的色散影响,具备全光谱成像兼容能力。

表 1 单发超快光场成像技术综合对比

Table 1 Comparative comparison of single-shot ultrafast optical imaging techniques

Name	Spatial resolution	Temporal resolution	Number of frames	Advantage and disadvantage	Application
SS-FTOP	41 pixel×60 pixel	276 fs	4	High temporal resolution, limited sampling frames, low spatial resolution	Laser pulse characterization
DLIF	512 pixel×512 pixel	6.7 ps	9	High temporal resolution, only coherent light can be imaged	Light propagating in 3D scattering medium
STAMP	450 pixel×450 pixel	190 fs	6	Complex system, different chromatic benchmark	Laser induced plasma, phonon propagation
SF-STAMP	400 pixel×300 pixel	133 fs	25	Simplified system, high sampling frames, different chromatic benchmark	Phase transition in GST
4f-STAMP	450 pixel×450 pixel	7.9 ps	18	Simplified system, high sampling frames, different chromatic benchmark	Laser-induced ablation
ADPDF-SF-STAMP	1/5 camera pixels	2 ps	5	Frame rate, exposure time, and frame intensities can be independently adjusted, different chromatic benchmark	Laser pulse characterization, laser induced ablation
ADSTG	100 pixel×100 pixel	50 fs	7	High temporal resolution, low spatial resolution, different chromatic benchmark	Laser pulse characterization
UASFC	30 lp/mm	3 ps	6	High spatial resolution, different chromatic benchmark	Laser pulse characterization
SS-TSFM	Full camera pixels	210 fs	14	High sampling frames, complex amplitudes	Glass ablation, scattering propagation
SS-FDT	128 pixel×128 pixel	2.4 ps	60	High sampling frames, complex amplitudes	Nonlinear propagation
FRAME	1002 pixel×1004 pixel 15 lp/mm	200 fs	4	Full spectroscopic capability, high temporal resolution, strong expansibility	Laser pulse characterization, combustion
MUSIC	Full camera pixels	1 ns	4	Full spectroscopic capability, no need for ultrashort light, the image may be aliased	Laser induced plasma, coherent microwave scattering
THPM	2048 pixel×2048 pixel	1.6 ns	2	Polarization and complex amplitudes, limited sampling frames	Damage in polarization-sensitive materials
AOCFP	180 lp/mm	34 ps	4	High spatial resolution, complex amplitudes, identical chromatic benchmark	Laser driving air, laser driving Al
FINCOPA	83 lp/mm	50 fs	4	High spatial resolution, strong expansibility, different chromatic benchmark	Plasma grating evolution, rotating optical field
Icarus	1024 pixel×512 pixel	1 ns	4	Single line-of-sight, high spatial resolution, low temporal resolution	High-power laser evolution, high energy density physics

MUSIC 不需要使用超短脉冲作为探针光,其时间分辨是依靠各子束的不同延迟时间和窄门宽选通相机实现的,不同帧的图像可能存在混叠。基于 FRAME、MUSIC 等的技术可以实现对激光脉冲表征、光学克尔门演化、火焰燃烧、激光诱导产生等离子体、相干微波散射等瞬态事件的超快成像。THPM 利用二维光栅复合编码获得正交偏振态下的复振幅信息,尤其适合监测偏振敏感材料中的超快现象,但是采样帧数有限。在空间频率复用类方法中,增加帧数会导致空间频域信息的重叠,这表明采样帧数与空间分辨间存在制约关系。

光束触发快门类方法是利用超短激光脉冲本身的短脉宽作为触发快门去截断瞬态事件的,主要有 AOCFP 和 FINCOPA。AOCFP 基于并行结构相干快

门原理,采用同轴干涉分幅成像方式,不仅保持各帧图像的同—空间和光谱基准,还可以获得复振幅信息,但是 AOCFP 分光合束光路较复杂,难以实现较大的采样帧数。实验中,采用 AOCFP 实现了激光诱导空气电离和激光加载铝箔等瞬态事件的 4 分幅超快成像。FINCOPA 是基于非共线光学参量放大原理的,其时间分辨、空间分辨、采用帧数和采样频率间不存在相互制约的情况,时间分辨和空间分辨可达 50 fs 和 83 lp/mm。然而,受限于激光系统和光路结构配置,FINCOPA 难以实现较大的采样帧数。利用 FINCOPA 的超快时间分辨能力可以实现对超快旋转光场与等离子体光栅等瞬态事件的实时成像监测。类似于时间波长映射类方法,FINCOPA 相机所获取的多幅图像不是同一光谱基准。

被动式探测类方法不对光信息进行直接调制,不

需要主动照明,由超快光电探测器和先进算法实现超快时间分辨。其中,Icarus 相机作为目前实用度较高的原位存储电子快门相机,能够实现单视线成像,并且具有较高的空间分辨率。因此,它已经应用于高能量密度物理和高功率光场的含时分分辨诊断方面。然而,由于受到半导体工艺的限制,Icarus 相机的时间分辨难以达到亚纳秒级别。

单发超快光场成像技术的前景充满无限可能,其创新的原理和精巧的设计为科学探索提供了广阔的平台。尽管不同的单发超快光场成像技术有特定的局限性,但它们各自也具备独特的优势,其性能特点和表现出的优势会因原理的差异而不同。首先,单发超快光场成像技术将不断追求更高的采样帧数、更短的时间分辨率、更高的空间分辨率、更丰富的维度信息获取能力及更强的兼容性。以多维度信息获取能力为例,如光强、相位和偏振等,多维度的信息获取能力将极大地扩展单发超快光场成像技术的应用范围,使我们能够更深入地洞察瞬态事件的演变过程。其次,单发超快光场成像技术应更加注重与物理学、化学、生物学等领域的实际超快成像需求场景的结合。通过优化设计,不断创新,进一步拓展其应用范围。例如,在物理学领域,单发超快光场成像技术有助于揭示高功率激光非线性传输的物理机制,研究等离子体的演化规律,表征超快光场本身的演化特性,观察晶体相变,研究火焰燃烧和三维散射等瞬态演化现象的机理。再者,单发超快光场成像技术在化学领域的应用价值也不容忽视。它能够用来研究化学反应的动力学过程,揭示化学反应的时间尺度、反应路径和产物分布等,进一步理解化学反应的微观机制和过程,为材料科学、能源科学和环境科学等领域提供重要的基础数据。在生物学领域,单发超快光场成像技术同样可以用来研究细胞膜的动态行为、神经信号的传递及蛋白质的折叠等精细过程,使我们更好地了解生命活动的本质和机制,为疾病诊断和治疗提供新的思路和方法。

此外,新技术的不断发展将显著提升现有单发超快光场成像技术的性能。例如:结合 MUSIC 和 Icarus 相机可以实现更为精细的时间分辨和更高的采样帧数;结合光谱复用层析成像技术有助于解决 SS-FDT 探测角度有限的问题,提升系统的空间分辨力。激光技术、光电子技术、非线性光学、成像理论和计算技术等多学科的快速融合发展将为单发超快光场成像技术的创新发展提供坚实的基础,并将进一步提升现有技术的性能,推动对各类超快动态现象的研究,不断拓展人类对未知领域的认知边界。

参 考 文 献

- [1] Zylstra A B, Hurricane O A, Callahan D A, et al. Burning plasma achieved in inertial fusion[J]. *Nature*, 2022, 601(7894): 542-548.
- [2] Kritcher A L, Young C V, Robey H F, et al. Design of inertial fusion implosions reaching the burning plasma regime[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(3): 251-258.
- [3] Danson C N, Gizzi L A. Inertial confinement fusion ignition achieved at the National Ignition Facility: an editorial[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2023, 11: e40.
- [4] Kiely-Collins H, Winter G E, Bernardes G J L. The role of reversible and irreversible covalent chemistry in targeted protein degradation[J]. *Cell Chemical Biology*, 2021, 28(7): 952-968.
- [5] Zhu D Y, Li X Y, Li Y L, et al. Transformation of one-dimensional linear polymers into two-dimensional covalent organic frameworks through sequential reversible and irreversible chemistries[J]. *Chemistry of Materials*, 2021, 33(1): 413-419.
- [6] Zhang Y D, Shen B L, Wu T, et al. Ultrafast and hypersensitive phase imaging of propagating internodal current flows in myelinated axons and electromagnetic pulses in dielectrics[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5247.
- [7] Liang J Y, Wang L V. Single-shot ultrafast optical imaging[J]. *Optica*, 2018, 5(9): 1113-1127.
- [8] Pupeikis J, Hu W, Willenberg B, et al. Efficient pump-probe sampling with a single-cavity dual-comb laser: application in ultrafast photoacoustics[J]. *Photoacoustics*, 2023, 29: 100439.
- [9] Tikhonov D S, Blech A, Leibscher M, et al. Pump-probe spectroscopy of chiral vibrational dynamics[J]. *Science Advances*, 2022, 8(49): eade0311.
- [10] Li P, Zhou L D, Feng B, et al. Theoretical analysis on small-scale self-focusing of multi-wavelength beams in an isotropic medium[J]. *Laser Physics*, 2020, 30(8): 085401.
- [11] Thul D, Richardson M, Rostami Fairchild S. Spatially resolved filament wavefront dynamics[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8920.
- [12] Guo H, Wang T J, Zhang X, et al. Direct measurement of radial fluence distribution inside a femtosecond laser filament core[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15529-15541.
- [13] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 146-249.
- [14] Li Z, Han L, Ouyang X P, et al. Three-dimensional laser damage positioning by a deep-learning method[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10165-10178.
- [15] Ding W Y, Chen M J, Cheng J, et al. Laser damage evolution by defects on diamond fly-cutting KDP surfaces [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 237: 107794.
- [16] Abu-Shawareb H, Acree R, Adams P, et al. Lawson criterion for ignition exceeded in an inertial fusion experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(7): 075001.
- [17] Schaeffer D B, Cruz F D, Dorst R S, et al. Laser-driven, ion-scale magnetospheres in laboratory plasmas. I. Experimental platform and first results[J]. *Physics of*

- Plasmas, 2022, 29(4): 042901.
- [18] Grepl F, Tryus M, Chagovets T, et al. Parametric amplification as a single-shot time-resolved off-harmonic probe for laser-matter interactions[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: e45.
- [19] Döpp A, Eberle C, Howard S, et al. Data-driven science and machine learning methods in laser-plasma physics[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: e55.
- [20] Mikami H, Gao L, Goda K. Ultrafast optical imaging technology: principles and applications of emerging methods[J]. Nanophotonics, 2016, 5(4): 497-509.
- [21] Chen R Y, Wang Y Z, Shao J D, et al. High-damage-threshold chirped mirrors for next-generation ultrafast, high-power laser systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(2): 93-96.
- [22] Wang T, Li C, Ren B, et al. High-power femtosecond laser generation from an all-fiber linearly polarized chirped pulse amplifier[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: e25.
- [23] Hart P A, Carpenter A, Claus L, et al. First X-ray test of the Icarus nanosecond-gated camera[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11038: 110380Q.
- [24] Lewis A, Baker S, Corredor A, et al. New design yields robust large-area framing camera[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(8): 083103.
- [25] Gao L, Liang J Y, Li C Y, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. Nature, 2014, 516(7529): 74-77.
- [26] Tang H C, Men T, Liu X L, et al. Single-shot compressed optical field topography[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 244.
- [27] Wang X F, Yan L H, Si J H, et al. High-frame-rate observation of single femtosecond laser pulse propagation in fused silica using an echelon and optical polarigraphy technique[J]. Applied Optics, 2014, 53(36): 8395-8399.
- [28] Nakagawa K, Iwasaki A, Oishi Y, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) [J]. Nature Photonics, 2014, 8(9): 695-700.
- [29] Suzuki T, Hida R, Yamaguchi Y, et al. Single-shot 25-frame burst imaging of ultrafast phase transition of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ with a sub-picosecond resolution[J]. Applied Physics Express, 2017, 10(9): 092502.
- [30] Moon J, Yoon S, Lim Y S, et al. Single-shot imaging of microscopic dynamic scenes at 5 THz frame rates by time and spatial frequency multiplexing[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 4463-4474.
- [31] Ehn A, Bood J, Li Z M, et al. FRAME: femtosecond videography for atomic and molecular dynamics[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(9): e17045.
- [32] Inoue T, Junpei Y, Itoh S, et al. Spatiotemporal observation of light propagation in a three-dimensional scattering medium[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 21890.
- [33] Kakue T, Tosa K, Yuasa J, et al. Digital light-in-flight recording by holography by use of a femtosecond pulsed laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(1): 479-485.
- [34] Saiki T, Hosobata T, Kono Y, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography boosted by a branched 4f system with a slicing mirror[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31914-31922.
- [35] Touil M, Idlahcen S, Becheker R, et al. Acousto-optically driven lensless single-shot ultrafast optical imaging[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 66.
- [36] Xie C, Meyer R, Froehly L, et al. *In-situ* diagnostic of femtosecond laser probe pulses for high resolution ultrafast imaging[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 126.
- [37] Gao G L, He K, Tian J S, et al. Ultrafast all-optical solid-state framing camera with picosecond temporal resolution[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8721-8729.
- [38] Yang Q, Wang T, Gao G L, et al. Ultrafast time-response characteristics of AlGaAs materials[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10843: 108430W.
- [39] Fan Y P, Li J Z, Xu S X, et al. A single-frame full spatiotemporal field distribution measurement method[J]. Optik, 2016, 127(24): 11636-11643.
- [40] Eichler H J, Günter P, Pohl D W. Laser-induced dynamic gratings[M]. Cham: Springer, 2013.
- [41] Si Z, Shen X, Zhu J X, et al. All-reflective self-referenced spectral interferometry for single-shot measurement of few-cycle femtosecond pulses in a broadband spectral range[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(2): 021202.
- [42] Li Z Y, Pai C H, Chang Y Y, et al. Single-shot visualization of evolving, light-speed structures by multiobject-plane phase-contrast imaging[J]. Optics Letters, 2013, 38(23): 5157-5160.
- [43] Li Z Y, Zgadzaj R, Wang X M, et al. Single-shot tomographic movies of evolving light-velocity objects[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3085.
- [44] Wang X L, Zhai H C, Mu G G. Pulsed digital holography system recording ultrafast process of the femtosecond order[J]. Optics Letters, 2006, 31(11): 1636-1638.
- [45] Li Z M, Borggren J, Berrocal E, et al. Simultaneous multispectral imaging of flame species using Frequency Recognition Algorithm for Multiple Exposures (FRAME) [J]. Combustion and Flame, 2018, 192: 160-169.
- [46] Dorozynska K, Kornienko V, Aldén M, et al. A versatile, low-cost, snapshot multidimensional imaging approach based on structured light[J]. Optics Express, 2020, 28(7): 9572-9586.
- [47] Ek S, Kornienko V, Kristensson E. Long sequence single-exposure videography using spatially modulated illumination[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 18920.
- [48] Cai W W, Wang X L, Yu T. Spatial-frequency encoded imaging of multangular and multispectral images[J]. The Review of Scientific Instruments, 2021, 92(1): 015111.
- [49] Dong J L, You P, Tomasino A, et al. Single-shot ultrafast terahertz photography[J]. Nature Communications, 2023, 14: 1704.
- [50] Gragston M, Smith C, Kartashov D, et al. Single-shot nanosecond-resolution multiframe passive imaging by multiplexed structured image capture[J]. Optics Express,

- 2018, 26(22): 28441-28452.
- [51] Gragston M, Smith C D, Harrold J, et al. Multiplexed structured image capture to increase the field of view for a single exposure[J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(1): 225.
- [52] Hu C Y, Yang S G, Chen M H, et al. Quadrature multiplexed structured illumination imaging[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 6900708.
- [53] Yue Q Y, Cheng Z J, Han L, et al. One-shot time-resolved holographic polarization microscopy for imaging laser-induced ultrafast phenomena[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14182-14191.
- [54] Mishra Y N, Boggavarapu P, Chorey D, et al. Application of FRAME for simultaneous LIF and LII imaging in sooting flames using a single camera[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5534.
- [55] McCord W, He Z C, Williamson N, et al. Two-phase accurate multiplexed structured image capture (2pAc-MUSIC)[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106621.
- [56] Dorozynska K, Kristensson E. Implementation of a multiplexed structured illumination method to achieve snapshot multispectral imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17211-17226.
- [57] Kornienko V, Kristensson E, Ehn A, et al. Beyond MHz image recordings using LEDs and the FRAME concept[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 16650.
- [58] Chen G H, Li J F, Peng Q X, et al. All-optical coaxial framing photography using parallel coherence shutters[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 415-418.
- [59] Chen G H, Li J F, Li J. Femtosecond multiframe digital holography with parallel coherence shutters[C]//*Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019*, May 19-23, 2019, Bordeaux, France. Washington, DC: OSA, 2019: Th4B.1.
- [60] Zeng X K, Zheng S Q, Cai Y, et al. High-spatial-resolution ultrafast framing imaging at 15 trillion frames per second by optical parametric amplification[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(5): 056002.
- [61] 郑麦杰, 陈振宽, 王聪颖, 等. 非线性超快成像技术的时间分辨率探究[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2022, 39(4): 383-389.
- Zheng M J, Chen Z K, Wang C Y, et al. The temporal resolutions of the ultrafast imaging technologies based on nonlinear optics[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2022, 39(4): 383-389.
- [62] Stanford Computer Optics. Picosecond high speed ICCD camera family: 4 Picos[EB/OL]. [2023-08-11]. <https://stanfordcomputeroptics.com/products/picosecond-iccd.html>.
- [63] 中智科仪(北京)科技有限公司. 皮秒时间分辨像增强相机 IsCMOS[EB/OL]. [2023-08-11]. <http://www.cis-systems.com/pmsjfbzqxj>.
- CISS Intelligent Scientific Systems. Picosecond time-resolved image enhancement camera IsCMOS[EB/OL]. [2023-08-11]. <http://www.cis-systems.com/pmsjfbzqxj>.
- [64] Heshmat B, Satat G, Barsi C, et al. Single-shot ultrafast imaging using parallax-free alignment with a tilted lenslet array[C]//*CLEO: Science and Innovations 2014*, June 8-13, 2014, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2014: STu3E.7.
- [65] Claus L, Boone A, England T, et al. Design and characterization of a novel 1-ns multi-frame imager for the Ultra-Fast X-ray Imager (UXI) program at Sandia National Laboratories[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10763: 107630M.
- [66] Hurd E R, Tate T, Dayton M S, et al. Time Resolved Near Field (TRNF) diagnostic four-frame nanosecond gated hybrid CMOS image sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11114: 1111413.
- [67] Chen H, Golick B, Palmer N, et al. Upgrade of the gated laser entrance hole imager G-LEH-2 on the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(3): 033506.
- [68] Lazovsky L, Cismas D, Allan G, et al. CCD sensor and camera for 100 Mfps burst frame rate image capture[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5787: 184-190.
- [69] 田进寿. 条纹及分幅相机技术发展概述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(11): 112003.
- Tian J S. Introduction to development of streak and framing cameras[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(11): 112003.
- [70] Lanier T E, Cohen S J, di Nicola J M G, et al. Time-gated measurements of fusion-class laser beam profiles[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11259: 1125915.
- [71] Claus L D, Sanchez M, Robertson G A, et al. Design and characterization of an improved 2 ns multi-frame imager for the ultra-fast X-ray imager (UXI) program at Sandia National Laboratories[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10390: 103900A.
- [72] 王峰, 理玉龙, 关赞洋, 等. 压缩感知技术在激光惯性约束聚变研究中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(3): 031021.
- Wang F, Li Y L, Guan Z Y, et al. Application of compressed sensing technology in laser inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(3): 031021.
- [73] Matin A, Wang X. Compressive coded rotating mirror camera for high-speed imaging[J]. *Photonics*, 2021, 8(2): 34.
- [74] Lu Y, Wong T T W, Chen F, et al. Compressed ultrafast spectral-temporal photography[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(19): 193904.
- [75] Kim T, Liang J Y, Zhu L R, et al. Picosecond-resolution phase-sensitive imaging of transparent objects in a single shot[J]. *Science Advances*, 2020, 6(3): eaay6200.
- [76] 柯钧, 张临夏, 周群. 压缩感知在光学成像领域的应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111006.
- Ke J, Zhang L X, Zhou Q. Applications of compressive sensing in optical imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111006.
- [77] Qi D L, Zhang S, Yang C S, et al. Single-shot compressed ultrafast photography: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(1): 014003.