

doi:10.3788/gzxb20184710.1011001

基于超短激光脉冲扫描法的超高速分幅 相机时间响应特性测定

朱斌^{1,2}, 滕建^{1,2}, 吴玉迟^{1,2,3}, 范伟^{1,2}, 王少义^{1,2}, 税敏^{1,2}, 李纲^{1,2},
张天奎^{1,2}, 于明海^{1,2}, 谭放^{1,2}, 杨月^{1,2}, 卢峰^{1,2}, 闫永宏^{1,2}, 谷渝秋^{1,2,3}

(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 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

(3 上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海, 200240)

摘 要: 采用超短激光脉冲对一台四通道超高速分幅相机曝光过程进行时间扫描, 测定超高速分幅相机时间响应特性。通过对四个通道的同时测定, 给出最短曝光时间下相机所有通道的时间响应特性曲线。由此曲线得到相机各通道的实际曝光时间、开/关门时间、曝光过程中的响应变化以及四个通道不同的响应特性等诸多信息。通过对相机时间响应特性的测定, 考核相机的实际工作性能与工作状态, 并为实验数据解读提供参考。超短激光脉冲扫描法可以作为高速摄影类设备时间响应特性测定的标准方法。

关键词: 超短脉冲; 扫描方法; 分幅相机; 时间响应特性; 动态诊断

中图分类号: TB872; TB853

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)10-1011001-7

Mensuration on the Time Response Characteristic of Ultra High Speed Framing Camera Based on Scanning Method with Ultra-short Laser Pulse

ZHU Bin^{1,2}, TENG Jian^{1,2}, WU Yu-chi^{1,2,3}, FAN Wei^{1,2}, WANG Shao-yi^{1,2},
SHUI Min^{1,2}, LI Gang^{1,2}, ZHANG Tian-kui^{1,2}, YU Ming-hai^{1,2}, TAN Fang^{1,2}, YANG Yue^{1,2},
LU Feng^{1,2}, YAN Yong-hong^{1,2}, GU Yu-qiu^{1,2,3}

(1 Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(2 Sciences and Technology on Plasma Physics Laboratory, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(3 IFSA Collaborative Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the scanning method with ultra-short laser pulse, the measurement of time response characteristic was implemented on a Ultra High Speed Framing Camera (UHSFC) which has four channels. All of the four channels' curves of time response were carried out simultaneously. Actual exposure time, opening and shutting time, modulation of response and so on were revealed in these curves. The actual performance and state of the UHSFC can be examined with the help of these information. The analysis of experimental data can also be profited from the mensuration.

Key words: Ultra-short pulse; Scanning method; Framing camera; Time response characteristic; Dynamic diagnosis

OCIS Codes: 110.4155; 110.5200; 320.4240; 320.7100

0 引言

随着科学技术水平的飞速发展, 对更快的时间尺度、更小的空间尺度、更高的电磁场强度等的追求, 使人

基金项目: 等离子体物理重点实验室基金 (No. 6142A04020102) 和国家自然科学基金 (Nos. 11705177, 11605095) 资助

第一作者: 朱斌 (1985-), 男, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为激光等离子体物理. Email: zhubin631@163.com

通讯作者: 谷渝秋 (1968-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光等离子体物理、激光加载下的材料动力学等. Email: yqgu@caep.cn

收稿日期: 2018-05-15; 录用日期: 2018-06-21

<http://www.photon.ac.cn>

们在各自然科学领域的研究深度及广度较过去大为拓展.在高速摄影方面,过去研究的子弹的飞行弹道、汽车的碰撞过程、炸药的爆炸过程等,使用传统的数字式高速相机^[1](帧频 $\sim 10^6$ fps)或者转镜式高速摄影机^[2](帧频 $\sim 10^7$ fps)等都可以较好满足需求.而更高速运动的物理过程,如等离子体的膨胀、Z 箍缩、强加载下材料微喷射过程以及现今火热的电磁轨道炮等,其运动速度动辄数 km/s 甚至更高.要“冻结”如此高速的物理过程,获得高质量图像,必然要求探测设备具有更快的快门,以最大限度降低运动模糊引起的图像空间分辨率下降.此时,具有更高帧频($>10^8$ fps)、更短曝光时间(数 ns \sim 亚 ns)的超高速分幅相机就成为了记录这些物理过程必不可少的测量设备.

本文所指的超高速分幅相机指的是工作在可见光波段的光学分幅相机,主要类型包括微波传输型分幅相机、交叉点扫描多光栏分幅相机以及多通道门选通型分幅相机^[3].其中多通道门选通型可见光分幅相机与其它两种相机相比,具有幅间隔及单幅曝光时间独立可调的优点,因而成为目前物理实验中选用的主流超高速分幅相机.目前国内外的超高速分幅相机包括英国的 SIMX 相机,德国的 HSFC-PRO 相机,美国的 XX Rapid Frame 相机、MODEL 214-8 及 222-4G 相机,深圳大学以及中物院流体物理研究所自主研发的超高速分幅相机等.其中 XX Rapid Frame 相机最短曝光时间可达 0.2 ns,其它相机最短曝光时间在 3 \sim 10 ns 之间^[4].此外,新型全光固体分幅相机,因其时间分辨率可达 ps 级,近几年来也引起了广泛关注^[5],但因原理上与本文的超高速分幅相机并不一致,因此本文不做讨论.

时间响应特性是超高速分幅相机的关键特性,它直接反映了相机的超高速摄影性能.时间响应特性不仅包括上文提到的曝光时间,还包括了曝光全程的开/关门时间以及响应变化趋势.很显然,一台超高速分幅相机在拍照时开/关门时间越短、曝光时间越短、曝光过程中的响应越平滑,其获得的图像所能反映的快速变化过程就越接近真实的瞬间.因而,获得相机的时间响应特性,对了解相机的实际性能,并准确分析实验图像具有重要意义.

鉴于超高速分幅相机是以带门控型像增强器的电荷耦合器件(Intensified Charge Coupled Device, ICCD)^[6-7]为核心器件,其时间响应特性很大程度上取决于具有门选通以及图像增强作用的门控型像增强器的性能.因此国内研究团队比如刘宁文与谢红卫等都以门控型像增强器为研究对象开展相关研究^[8-9].其中刘宁文等采用光纤束阵列法重点研究了门控型像增强器的曝光时间.该方法的优点是只需一次曝光就可通过数光纤点数量的方式得到相机的曝光时间.但由于需要事先制备高精度的光纤束阵列,因此测量成本较高;同时为避免光纤对激光脉冲的时间展宽,光纤束阵列使用的是单模光纤^[10],耦合效率低,且对入射角极为敏感,因此实验中很难保证各光纤的出射光强一致.这导致无法判断测到的光纤束点阵图像中各光纤点的强度变化,是由于相机各时刻响应的不同引起还是由于光纤自身出射的强度不一致引起,从而无法准确给出曝光过程中的开/关门时间及响应变化趋势.谢红卫等重点研究的是像增强器开/关门过程中的“孔栏”效应,同样也未给出曝光过程中的响应变化趋势.

本文采用高稳定的具有 kHz 重频输出能力的飞秒激光器作为超短脉冲扫描探针,对标称最短曝光时间为 3 ns 的四分幅超高速相机进行了时间响应特性测定.通过对时间响应曲线的扫描测定,不仅给出了相机的实际曝光时间,同时还给出了相机的开/关门时间以及曝光过程中的响应变化趋势.该方法可作为测定超高速相机时间响应特性的标准方法.

1 相机结构及工作原理

该超高速分幅相机的结构示意图如图 1 所示,主要由物镜、分光光路、输出镜、ICCD、电源及控制单元组成.由于相机为四分幅,因而在分光光路上不同于 8 分幅或者 16 分幅相机的棱锥反射镜分光,而是采用了光路较为简单的棱镜分光方式^[11].物体发出的光线经物镜变成平行光进入分光光路,通过分光棱镜后经输出镜成像至 ICCD 的光阴极上.这种分光方式的优点是可以有效避免在分光的同时对物体像的分割,即所有通道的 ICCD 接收到的像都是一致的,且可以降低光学元件上可能存在的灰尘等杂质粒子对像质的影响.在结构上各 ICCD 距分光棱镜的位置均经过仔细调整,以保证各通道距物体的光程严格一致.相机工作时,通过电源和控制单元根据所需要的时间顺序对 ICCD 的像增强器进行依次加电,对图像进行选通及增强,即可实现 ICCD 1 至 ICCD 4 的依次曝光,从而实现了对物体的超高速分幅照像.

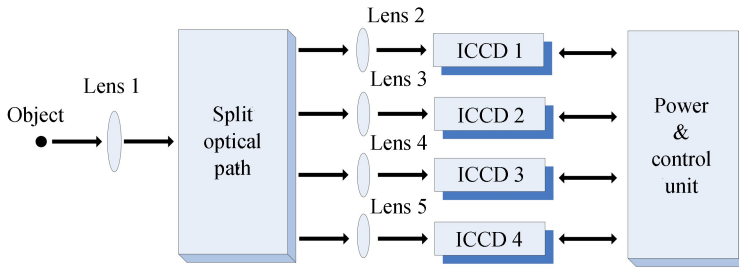


图1 超高速分幅相机结构示意图

Fig.1 Sketch map on configuration of UHSFC

2 超短激光脉冲扫描方法

超高速分幅相机的高时间分辨能力是通过 ICCD 上的门控像增强器来实现的.该相机的门控像增强器结构及工作原理如图 2.当物体发出的光子入射到光阴极时,光阴极将发射出光电子.光电子进入微通道板 (Micro Channel Plate, MCP)实现电子倍增并在加速电压的作用下轰击在荧光屏上,发出增强后的可见光.在光电子的初始发射阶段,通过在光阴极与 MCP 前端面之间施加脉冲电压,即可实现光电子的发射与抑制.如光阴极施加负压时,光电子将被加速发射至 MCP.而施加正压时,光电子将被阻止在光阴极处无法发射,后续的电子倍增与荧光屏发光过程也就不会发生.由此即可控制像增强器对入射光线的开与关.

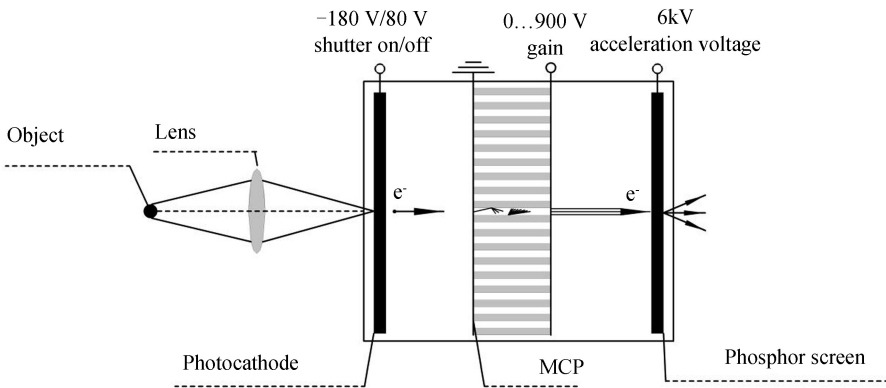


图2 门控型像增强器示意图

Fig.2 Sketch map of gated image intensifier

很显然,当像增强器处于关闭状态时,光阴极处的电压为正压 V_+ .由关闭到打开,电压将由 V_+ 转变为负压 V_- .由打开转变为关闭,电压又将由 V_- 转变为 V_+ .这样一个 $V_+ \rightarrow V_- \rightarrow V_+$ 的过程,即是像增强器的一个完整的开关过程.因而,之前人们通常以施加在光阴极上的脉冲电压的 $V_+ \rightarrow V_- \rightarrow V_+$ 过程所需的时间作为相机的曝光时间.但实际上,由于光电子发射具有一定的弛豫时间,即使电压已经由 $V_- \rightarrow V_+$,光电子的发射速度也不可能瞬间变为 0,仍会持续一小段时间的发射,并且 MCP 的电子倍增系数与其工作电压也是呈极大的非线性关系^[12].这都将导致 CCD 感应到的光学曝光时间与脉冲电压的持续时间存在一定差别,因而有必要直接测量相机的光学曝光时间.

此外,即使在像增强器开门后,其电压值 V_- 也不是恒压,仍存在一定的起伏. V_- 的起伏将直接影响入射到 MCP 上的光电子的动能.而 MCP 在电子倍增过程中的二次电子发射产额是与入射电子动能相关的函数^[12].因而在开门后的不同时刻,即使入射光子数及 MCP 增益系数保持恒定,由 MCP 出射的光电子数目也将发生起伏,最终将影响 CCD 记录到的光强的变化.这个变化过程就是相机在开门后的时间响应变化曲线,通过对它的测定可以判断相机的工作状态,特别是脉冲电压的工作是否正常.

为了测定相机的时间响应特性曲线,本文采用超短激光脉冲扫描方法.原理示意如图 3.假定超高速分幅相机任一通道时间响应特性曲线为图中实线所示,整个曝光过程具有一定时间的上升沿、下降沿及平响应区.当一光强恒定的超短激光脉冲(图中虚线所示)在某一时刻入射至该通道时,该通道实际感应到的光强将是其响应系数与入射光强的乘积.由于扫描激光的脉宽远小于相机的曝光时间,即使考虑被棱镜展宽,其脉

冲宽度对相机的曝光时间而言仍可认为是一个 δ 脉冲,因而通过调节扫描激光与相机之间的相对延时,就可以获得该通道在不同时刻对探针光的响应强度,将这一系列响应强度以最强响应为基准做归一化,即可得到该通道的时间响应系数.将系数与相关联的时间轴画图即可得到真实的时间响应特性曲线.将相机的四个通道设置在同一延时及曝光时间下,可同时得到相机所有通道的时间响应特性曲线.这些曲线就反映了相机各通道的实际曝光时间、开/关门时间以及曝光过程中的响应变化趋势等特性.

3 实验设置

测定过程的实验设置如图 4.整个测定系统由飞秒激光器、高精度同步机、超高速分幅相机、漫反射屏以及计算机组成.其中飞秒激光器脉宽为 30 fs,中心波长 800 nm,输出频率 1 kHz,同时可单次输出.单脉冲能量约 8 mJ.高精度同步机采用的是斯坦福仪器公司的 DG645,触发晃动小于 25 ps.超高速分幅相机标称最短曝光时间 3 ns,共四个通道.

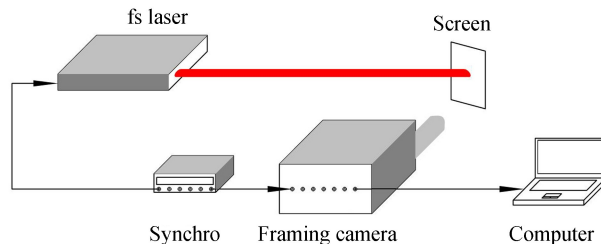


图 4 实验设置示意图
Fig.4 Sketch map of experimental setup

正式测定时,同步机分别与激光器及分幅相机连接,以控制激光的输出及分幅相机的启动,并调节二者之间的相对延时,延时调节步长 0.25 ns.飞秒激光器工作在单次输出模式下,出射光束直接照射在漫反射屏上形成较为均匀的散射光斑.分幅相机对屏上的光斑成像,相机前加入一定数量的滤片以控制光强在合适的强度.相机的四个通道均设置为标称的最短曝光时间 3 ns,且四个通道的增益保持一致.幅间延时间隔设置为 0,即四个通道同步采集.整个测定过程中保持激光器、屏和相机的相对位置不变.

4 结果与讨论

逐步调节扫描激光与分幅相机之间的相对延时,并保持激光器输出能量稳定.相机其中一个通道的响应图像如图 5 所示.图中从上至下从左至右,每幅图像之间的延时变化量为 0.25 ns.从图中可清晰得看到,随着延时的逐渐变化,相机对扫描激光的响应呈现出逐步增强的趋势,而在第二排及第三排图像中,响应逐步进入近似平响应区,之后响应逐步减弱至无响应.整幅图完整展示了相机曝光全过程,即相机的开门、曝光以及关门过程.其它几个通道也获得了类似图像.需要说明的是,在实验过程中并未观察到文献[9]中提到的“孔栏”现象.

鉴于分幅相机采用的科学级 CCD 在未饱和时可以保持较好的线性响应,即 CCD 计数值与入射光强成线性变化,入射光强越强,CCD 输出的图像计数值越高,因此可认为在入射光强一定的情况下,图 5 中图像强度的变化完全由相机自身的响应变化引起,且二者之间也是成线性变化关系.因此,以每幅图像中的强度积分值表征相机的响应强度,并以原理中提到的方法进行归一化处理,即可得到相机的时间响应系数.由于相机的四个通道为同步采集,因此以各通道的时间响应系数为纵轴,以相关联的时间轴为横轴作图,即可得到的相机四个通道的时间响应特性曲线,如图 6 所示.

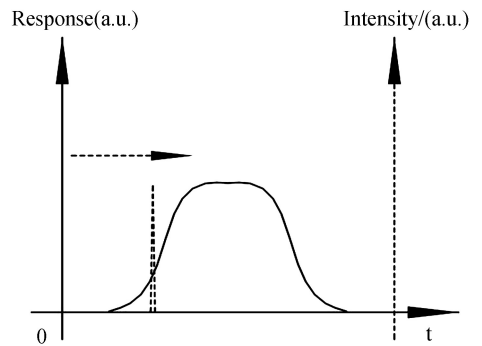


图 3 超短脉冲探针扫描方法示意图
Fig.3 Sketch map of scanning method with ultra-short probing pulse

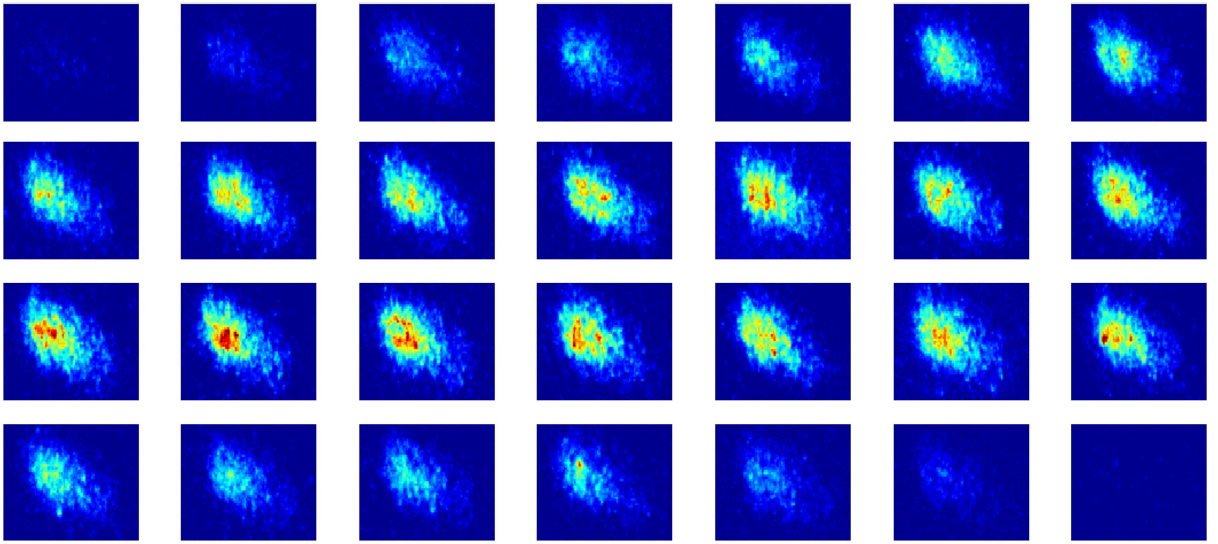


图5 相机同一通道不同时刻的响应图像

Fig.5 Responding images at different time in one of the channels

从图6可以获得相机曝光过程中的许多信息.首先,参考X射线分幅相机关于曝光时间的定义^[12],这里同样以时间响应曲线的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)作为各通道的曝光时间.即响应达到峰值的50%的时刻作为相机已经开门的时刻,降至峰值响应的50%的时刻作为开始关门的时刻,这中间所经历的时间定义为相机的曝光时间.同时,从图6可看到,由于相机自身存在一定的背景强度,相机的四个通道的响应曲线均在响应值的10%附近才开始迅速上升,而之前的响应值相对平缓.在关门端可以看出同样的趋势.因此这里将上升沿的10%响应时刻以及下降沿的10%响应时刻分别定义为相机开始开门以及完成关门的时刻.则响应曲线中上升沿的10%至50%即为相机的开门时间,下降沿的50%至10%为关门时间.由此可得,相机通道1至通道4的曝光时间依次约为4 ns、5 ns、5.25 ns以及5 ns.开/关门时间依次约为1 ns/1.25 ns、1 ns/0.75 ns、0.75 ns/1 ns以及1 ns/1 ns.

其次,在使用超高速分幅相机获取快速变化图像的过程中,图像自身的运动模糊也是必须考虑的参数,这决定了图像所能达到的最高空间分辨.运动模糊为相机曝光时间与物体运动速度的乘积.在计算运动模糊时,若曝光时间只考虑标称的3 ns或者实际测定得到的时间响应曲线半高全宽值,实际上会低估运动模糊造成的影响,低于50%响应以下的时间内,物体的运动模糊被人为忽略掉了,实际应考虑相机从开门到关门全过程中的运动模糊.以响应值10%为开/关门时间点,由图6可得到通道1至通道4的曝光全过程时间约为6.25 ns、6.5 ns、6.75 ns以及6.75 ns,这个值对估算图像运动模糊进而设计相应的实验参数至关重要.

第三,尽管测定过程中设置相机的四个通道间的相对延时为0,但从图6中显然可以看出,相机四个通道的启动时间并不一致.其中通道2和通道4同步较好,而通道1与通道3的启动时刻相差了近1 ns.这个参数在产品说明里一般不会提供,但如果缺少这个参数,在需要短时间间隔测量(如幅间距只有1 ns)的分幅照相物理实验中,有可能造成数据解读的重大错误.

在测量误差方面,实验误差可能来自多个方面:包括激光脉宽带来的误差、同步机的触发晃动、分幅相机自身的触发晃动、激光器与分幅相机之间的延时调节步长.这其中激光脉宽与同步机的触发晃动均在ps量级,对数ns的曝光时间测量影响极小,而分幅相机自身的触发晃动为0.25 ns,激光器与相机之间的延时调节步长也为0.25 ns,这两者主要决定了时间响应曲线的测量精度.二者合成的测量误差为

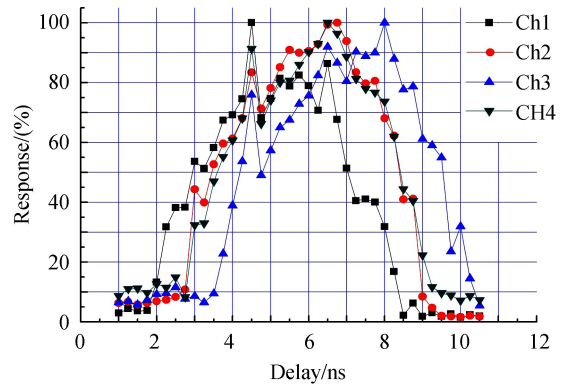


图6 相机所有通道的时间响应曲线

Fig.6 Responding curves of all the four channels

$$t = \sqrt{0.25^2 + 0.25^2} \approx 0.35 \text{ ns} \quad (1)$$

其中相机自身的触发晃动由相机硬件决定,无法更改.而减小激光器与相机之间的延时调节步长,可以提高测量的时间精度,从而减小在读取曲线数值时带来的误差.这个总的测量误差在文献[9]中并未讨论,文献[10]也忽略掉了相机自身的触发晃动以及测量步长带来的误差,实际上,这个量是不可忽视的,且占主要地位.

对于超高速分幅相机来说,其时间响应特性里的曝光时间,包括曝光全过程的总时间,以及开/关门时间是更重要的参数.只要相机工作正常,其开门后的响应即使有一定的起伏,也不影响曝光过程中一幅图像的获取.但是当相机出现异常,尤其是施加在光阴极上的脉冲电压异常时,时间响应曲线中将会出现诸如时间响应曲线宽度异常变宽,或者响应系数剧烈变化等情形.因次,测定超高速分幅相机的时间响应曲线对于检验相机的实际工作性能以及工作状态具有重要意义.而多个通道时间响应曲线的同时获取,对相机各通道的同步精度也是一个很好的检验.

5 结论

基于超短激光脉冲扫描法对一标称最短曝光时间 3 ns 的四通道超高速分幅相机进行了时间响应特性测定,同时获得了相机四个通道在最短曝光时间下的时间响应特性曲线.通过该曲线可直观得出相机的实际曝光时间、开/关门时间、曝光全过程总时间以及曝光过程中的响应变化曲线,同时给出了相机各通道间的同步精度信息.这些信息的获取对深入掌握相机实际性能及工作状态,并据此开展实验设计及数据解读具有重要价值.相比光纤束阵列法,超短激光脉冲扫描方法测量成本低,操作简单,获取的信息也更为准确全面,可以作为用于测量包括 ICCD、超高速分幅相机等高速摄影类设备时间响应特性的标准方法,也可以给其它类似设备如光学条纹相机的时间响应特性测量提供一定参考.

致谢 张惠鸽在文章写作中给予了诸多有益的建议和帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] LI Xian-yin, GUO Xue-bin, PU Chuan-jin, *et al.* Performance of APX-RS high speed camera and its application in blasting[J]. *Blasting*, 2010, **27**(2): 84-87.
李显寅,郭学彬,蒲传金,等. APX-RS 型高速相机在爆破方面的应用[J]. *爆破*, 2010, **27**(2): 84-87.
- [2] TAN Xian-xiang, HUANG Fu. Techniques and applications of high speed rotating mirror camera[J]. *High Speed Photography and Photonic*, 1988, **17**(1): 64-67.
谭显祥,黄福. 转镜式高速相机在爆炸实验中的某些应用[J]. *高速摄影与光子学*, 1988, **17**(1): 64-67.
- [3] SHAN Bao-zhong, GUO Bao-ping, NIU Han-ben. Multi-channel nano-second framing camera with gate selection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(12): 1963-1968.
单宝忠,郭宝平,牛憨笨. 多通道门选通纳秒分幅相机[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(12): 1963-1968.
- [4] ZHANG Tian-shu. Optical design and study of high-speed framing camera[D]. Changchun, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2016
张天舒. 高速分幅相机光学系统设计与研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [5] YUAN Fen-fang, LIU Xi-shun, CHEN Shao-rong, *et al.* Research on a novel all-optical solid framing camera framing mode[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2015, **30**(6): 1-8.
袁芬芳,刘希顺,陈绍荣,等. 一种新型的全固体分幅相机分幅方式的研究[J]. *光电技术应用*, 2015, **30**(6): 1-8.
- [6] ZHAO Ji-zhen, PENG Bo-dong, SHENG Liang, *et al.* The design of time resolved intensified CCD imaging system[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2010, **30**(8): 1063-1066.
赵吉祺,彭博栋,盛亮,等. 时间分辨型 ICCD 成像系统研制[J]. *核电子学与探测技术*, 2010, **30**(8): 1063-1066.
- [7] ZHAO Xin-cai, WEN Wei-feng, LI Jian, *et al.* Design of visible light ICCD and its application[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, **31**(3): 335-339.
赵新才,温伟峰,李剑,等. 可见光 ICCD 的研制及应用[J]. *高压物理学报*, 2017, **31**(3): 335-339.
- [8] LIU Ning-wen, CHANG Li-hua, XIAO Zheng-fei, *et al.* Measuring gating time of gated image intensifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(10): 2447-2450.
刘宁文,畅里华,肖正飞,等. 门控型像增强器开门时间测量[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(10): 2447-2450.
- [9] XIE Hong-wei, CHEN Jin-chuan, LI Hong-yun, *et al.* The study of turn on/turn off gated MCP image intensifier[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, **34**(10): 1196-1200.
谢红卫,陈进川,李宏云,等. MCP 像增强器开/关门时间特性研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2014, **34**(10): 1196-1200.
- [10] ZHAO Xin-cai, XIAO Zheng-fei, LI Jian, *et al.* Error analysis of exposure time measurement in ultra high speed

framing camera[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2015, **29**(6): 455-459.

赵新才,肖正飞,李剑,等. 超高速分幅相机曝光时间测量的误差分析[J]. 高压物理学报,2015, **29**(6): 455-459.

- [11] XIE Hong-bo, FANG Chun-lun, YANG Lei, *et al.* Analysis of image consistency for framing camera and improvement of framing method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 0411002.

谢洪波,方春伦,杨磊,等. 分幅相机像面一致性分析及分幅方法改进[J]. 光子学报,2017, **46**(4): 0411002.

- [12] PAN Jing-sheng. Study on microchannel plate and microchannel plate based imaging detection applications [D]. Changchun, Changchun University of Science and Technology, 2013.

潘京生. 微通道板及其成像探测应用的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.

Foundation item: The Science and Technology on Plasma Physics Laboratory Foundation (No. 6142A04020102), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 11705177, 11605095)

引用格式: ZHU Bin, TENG Jian, WU Yu-chi, *et al.* Mensuration on the Time Response Characteristic of Ultra High Speed Framing Camera Based on Scanning Method with Ultra-short Laser Pulse[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1011001

朱斌,滕建,吴玉迟,等.基于超短激光脉冲扫描法的超高速分幅相机时间响应特性测定[J].光子学报,2018,**47**(10):1011001