

文章编号: 1000-5773(2016)01-0037-05

# 超高速光电分幅相机及应用\*

刘宁文, 李 剑, 赵新才, 肖正飞, 李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621999)

**摘要:** 采用高精度、低像差的光学分幅技术, 结合高精度延时控制及超快门选通微通道板(MCP)轮替曝光技术, 以及 CCD 图像采集方法, 研制了高性能的超高速光电分幅相机, 其摄影频率为  $2 \times 10^8$  幅/秒, 像面空间分辨率为  $36 \text{ mm}^{-1}$ , 可连续拍摄 8 幅  $1600 \times 1200$  像素的大画幅图像。将该相机应用于钨丝发光实验和雷管破裂实验, 获得了清晰的实验图像。

**关键词:** 光电成像; 数字相机; 高速摄影; 分幅

**中图分类号:** O521.3      **文献标志码:** A

**doi:** 10.11858/gywlxb.2016.01.006

## 1 引 言

超高速光电分幅相机主要针对超快物理过程的测量, 如爆轰过程中壳体的膨胀断裂与分解过程、Z 箍缩等离子体参数测量、直线感应加速器(Linear Induction Accelerator, LIA)电子束斑诊断、激光聚变以及激光与物质相互作用等<sup>[1-4]</sup>。目前, 国际上综合指标最先进的超高速光电分幅相机是英国 Specialised Imaging 有限公司生产的 SIMX 系列, 其摄影频率为  $2 \times 10^9$  幅/秒; 国内综合指标较先进的超高速光电分幅相机由深圳大学研制, 其最高摄影频率为  $1 \times 10^8$  幅/秒<sup>[5]</sup>。为适应超快武器物理过程测量的纳秒时间分辨的需要(如 Z 箍缩过程、LIA 电子束斑诊断过程只有约 100 ns), 消除慢物理动态测量过程中由曝光时间长而造成的动态模糊, 研制具有高性能的超高速光电分幅相机具有重要的意义。本文介绍我们研制的超高速光电分幅相机及其在超快物理过程测量中的应用。

## 2 相机结构及工作原理

我们研制的超高速光电分幅相机由物镜、分光系统、门控型微通道板像增强器、耦合器、CCD 相机、工控机、同步延时控制器、快脉冲电源等组成, 其结构如图 1 所示。其中, 分光系统由分光物镜和紧接其后的分光棱锥(八棱锥分光)组成, 分光棱锥置于系统的出瞳位置, 入射光线经分光棱锥和反光镜反射后, 直接成像于接收系统。

超高速光电分幅相机的工作原理为: 被摄目标通过主物镜、第二物镜和分光系统后, 在门

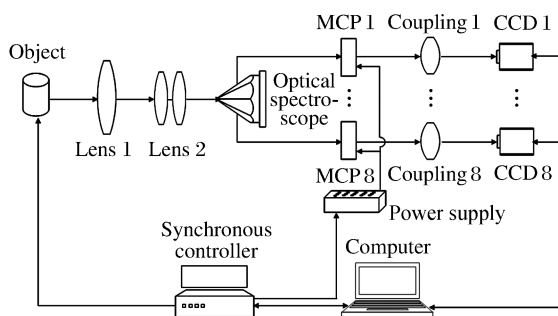


图 1 超高速光电分幅相机原理图

Fig. 1 Schematic of ultra-high-speed electro-optical framing camera

\* 收稿日期: 2014-11-18; 修回日期: 2015-03-27

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ130019)

作者简介: 刘宁文(1967-), 女, 学士, 研究员, 主要从事瞬态光学测试研究. E-mail: liuningwen1111@126.com

控型微通道板像增强器的阴极面上成像,目标像经像增强器放大耦合到 CCD 芯片中,CCD 相机输出的图像由计算机显示并完成图像处理;相机的拍摄频率和单幅曝光时间由同步控制部件和门控型微通道板像增强器专用脉冲电源设定<sup>[6]</sup>。

### 3 关键技术的实现

#### 3.1 分光系统

分光系统用于光学分幅。利用光学方法将被摄目标像分为 8 幅相同的像,要求光学分幅后的 8 幅像的像质和光强均匀一致。采用棱锥分光法实现光学分幅,图 2 为分光系统原理图。被摄目标经分光系统的放大光学系统和八棱锥分光镜后,将目标像均匀地分为 8 幅,经 8 个反射镜转向后成像到像增强器的光电阴极上。八棱锥分光镜只是将光的能量分为 8 等份,不影响图像的空间信息。

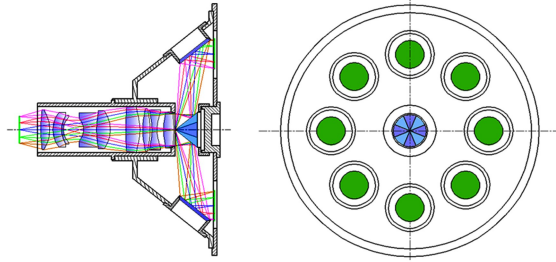


图 2 分光系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of splitting system

分光系统中的物镜选用双高斯结构,设计时进行了补偿和杂光分析,解决了各幅图像不均匀的难题<sup>[7]</sup>。分光系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function,MTF)曲线和像面畸变曲线见图 3。

可见,光学系统在空间分辨率为  $30 \text{ mm}^{-1}$  时,MTF 值( $M$ )大于或等于 0.7,光学畸变小于 0.2%。

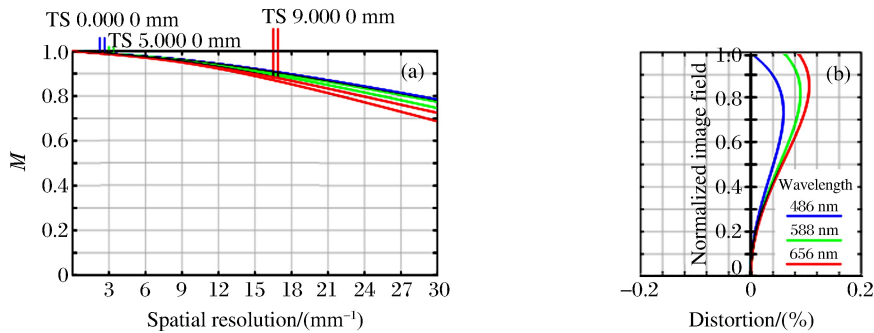


图 3 分光系统的调制传递函数(a)和像面畸变曲线(b)

Fig. 3 Modulation transfer function (a) and image plane distortion curve (b) of splitting system

#### 3.2 快脉冲电源

门控型像增强器在相机系统中起光学快门和图像增强的作用。作为高速光快门,其曝光时间取决于加在阴极上的脉冲宽度和上升时间。快门脉冲发生器须具有较短的延时、较小的触发晃动、较短的输出脉冲宽度,并且要求输出脉冲具有较窄的前、后沿。由于采用阴极选通,脉冲极性为负,因此电路中利用雪崩晶体管产生快速下降沿,经阶跃二极管削波后,得到所需的触发脉冲(可分档调节)。快脉冲形成电路的结构见图 4,其中:高压电源为高频高压组件,主电路由雪崩晶体管和充电电容组成。为防止误触发,雪崩晶体管的触发极采用负压偏置<sup>[8-10]</sup>。

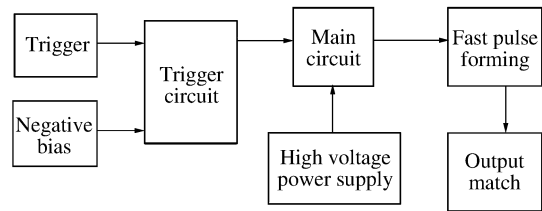


图 4 快脉冲形成电路结构

Fig. 4 Circuit structure of the fast-pulse formation apparatus

超高速光电分幅相机系统所选用的门控型像增强器的性能指标为:有效输入直径 17.5 mm,空间分辨率  $50 \text{ mm}^{-1}$ ,最大亮度增益  $1 \times 10^4 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ ,最大等效背景照度  $0.2 \mu\text{lx}$ 。

快脉冲电源的技术参数如下。

- (1) 脉冲宽度:10、15、20、50、100、200 ns 分档可调(标称值 $\times(1\pm 0.1)$ );
- (2) 脉冲幅值:门输入电阻为 4.7 k $\Omega$ ,门开启电压为 $-120\sim -200$  V,门关闭电压为 30~50 V;
- (3) 脉冲前沿:小于或等于 3 ns;
- (4) 触发漂移:1 ns。

### 3.3 精确延时同步控制

由单片机和 FPGA(Field-Programmable Gate Array)组成的同步触发脉冲在外触发脉冲或工控机自触发的同步下,分别触发 CCD 相机和门选通快脉冲电源。其功能之一是触发 8 个 CCD 相机,使 CCD 相机同步拍摄目标像,工控机对拍摄到的图像进行存储、显示和处理;功能之二是触发快高压脉冲产生电路,进而触发门控型像增强器,门控型像增强器开门时间的长短取决于快脉冲时间宽度和器件本身的性能,亮度增益取决于微通道板(MCP)输出端所加的电压。具体的设计方案为:由 PIC 单片机、FPGA、模拟延时芯片以及外围器件组成的同步控制电路,同步控制并延时输出 9 路信号,其中一路为零延时,其余 8 路为可调延时,零延时用于控制拍摄目标同步,8 路可调延时用于分别触发快脉冲电源。

## 4 研制结果

我们研制的超高速光电分幅相机实物见图 5。对其空间分辨率、摄影频率、门控时间、图像间隔、同步控制精度等指标进行静态测试,结果表明:该相机可拍摄 8 幅图像,摄影频率为  $2\times 10^8$  幅/秒,像面空间分辨率达  $36\text{ mm}^{-1}$  以上。该相机主要针对纳秒级快物理瞬态过程测量,具有以下主要功能:

- (1) 有 3 种工作方式,即静态照相、等待照相和同步照相;
- (2) 曝光时间分为 5、10、20、30、50 和 100 ns 6 档;
- (3) 图像间隔从 1 ns~1 ms 可调(间隔 1 ns);
- (4) CCD 增益以 1 为单位在 0~28 范围内可调,MCP 增益以 50 V 为间隔在 500~900 V 范围内可调;
- (5) 采用尼康标准接口,可根据实验需要更换不同规格的主物镜镜头。

将我们研制的超高速光电分幅相机与国内外同类产品进行比较,结果如表 1 所示。由表 1 可知:我们研制的超高速光电分幅相机的综合指标与英国 SIMX 相机相当,最短曝光时间为 5 ns,在抗电磁干扰能力和空间分辨率两个指标上具有明显的优势。



图 5 超高速光电分幅相机实物图

Fig. 5 Photograph of actual ultra-high-speed electro-optical framing camera

表 1 4 种超高速光电分幅相机性能比较

Table 1 Performance comparison of four different ultra-high-speed electro-optical framing camera

Camera	Frames	Photography frequency/ ( $10^8$ frame/s)	Pixel number	Shortest exposure time/(ns)
SIMX (UK)	8	20	1360 $\times$ 1024	
HSFC-PRO(Germany)	4	2	1280 $\times$ 1024	5
Shenzhen University	8	1	1367 $\times$ 1035	
This study	8	2	1600 $\times$ 1200	5
Camera	Shortest time span/(ns)	Spatial resolution/ ( $\text{mm}^{-1}$ )	Image quality	Anti-electromagnetic interference ability
SIMX (UK)	1	50(System)	No ghost	
HSFC-PRO(Germany)	1	50(MCP)	Ghost	General
Shenzhen University	10	15(System)	Ghost	Weak
This study	1	36(System)	No ghost	Strong

## 5 相机的应用

### 5.1 钨丝发光实验(曝光时间:5 ns)

采用我们研制的超高速光电分幅相机拍摄高压放电钨丝(直径为  $20\ \mu\text{m}$ )发光的动态过程,所获得的图像见图 6。实验中相机设置为同步工作方式,曝光时间为  $5\ \text{ns}$ ,第 1 幅图像的延时时间为  $0.60\ \mu\text{s}$ ,每幅图像的时间间隔为  $50\ \text{ns}$ ,第 8 幅图像的延时时间为  $1.00\ \mu\text{s}$ 。该组实验图像展现了高压放电钨丝从开始发光到发光最强的变化过程。

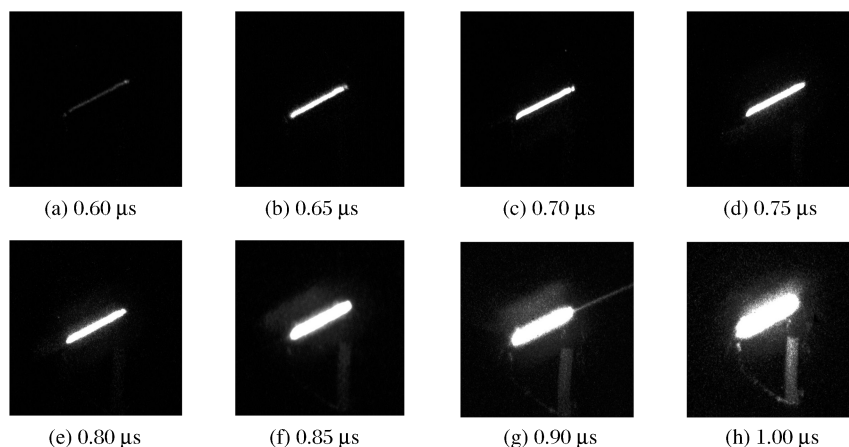


图 6 钨丝发光图像(曝光时间为  $5\ \text{ns}$ )

Fig. 6 Luminescent process of the tungsten wire ( $5\ \text{ns}$  of exposure time)

### 5.2 雷管破裂实验(曝光时间:30 ns)

采用我们研制的超高速光电分幅相机拍摄雷管破裂过程,所获得的图像见图 7。实验中相机设置为同步工作方式,曝光时间为  $30\ \text{ns}$ ,第 1 幅图像的延时时间为  $2.0\ \mu\text{s}$ ,每幅图像的时间间隔不等,第 8 幅图像的延时时间为  $12.0\ \mu\text{s}$ 。该组实验图像展现了雷管爆炸时雷管破裂及生成产物等过程。

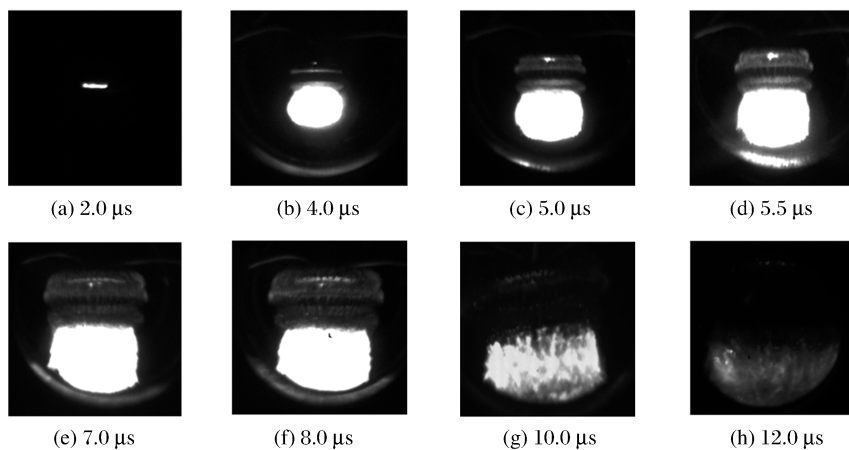


图 7 雷管破裂图像(曝光时间为  $30\ \text{ns}$ )

Fig. 7 Rupture process of the detonator ( $30\ \text{ns}$  of exposure time)

## 6 结 论

设计并研制的超高速光电分幅相机可拍摄从纳秒级到  $10\ \text{ms}$  的动态运动过程,摄影频率达到  $2 \times 10^8$  幅/秒,像面空间分辨率达  $36\ \text{mm}^{-1}$  以上,可拍摄 8 幅图像,具有静态照相、等待照相和同步照相 3 种工作方式。采用我们研制的超高速光电分幅相机,成功获取了高压放电钨丝的发光过程和雷管爆

炸破裂过程图像。该超高速光电分幅相机有望应用于激光与物质的相互作用、爆轰过程、材料微层裂破碎过程、LIA 电子束强度变化过程等超快物理实验。

## References:

- [1] 蒋耀港,马宏昊,沈兆武,等.冷激波灭火系统中激波对扑灭油盆火焰影响的研究[J].高压物理学报,2013,27(5):731-737.  
JIANG Y G, MA H H, SHEN Z W, et al. Study of the interaction between shock and pool in cold shock extinguishing system [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(5): 731-737.
- [2] 黄超,汪斌,刘仓理,等.柱形装药水中爆炸气泡的形态演变[J].高压物理学报,2011,25(3):235-241.  
HUANG C, WANG B, LIU C L, et al. On the shape evolution of underwater explosion bubbles by cylindrical charges [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(3): 235-241.
- [3] 王建,段吉员,赵继波,等.氢氧爆轰波在激波管中的成长机制研究[J].高压物理学报,2011,25(6):514-518.  
WANG J, DUAN J Y, ZHAO J B, et al. Study on the development mechanism of detonation wave for the hydrogen-oxygen mixture in a shock tube [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(6): 514-518.
- [4] 谭显祥.光学高速摄影测试技术[M].北京:科学出版社,1992.  
TAN X X. Test technique for optical high speed photography [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [5] 单宝忠,郭宝平,牛慈笨.多通道门选通纳秒分幅相机[J].光学精密工程,2007,15(12):1963-1968.  
SHAN B Z, GUO B P, NIU H B. Multi-channel nano-second framing camera with gate selection [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(12): 1963-1968.
- [6] 杜云飞,刘波,胡炳樑,等.全帧型CCD数码相机曝光时间的精确控制[J].光子学报,2009,38(4):1025-1028.  
DU Y F, LIU B, HU B L, et al. Precision control technology of exposure time for full-frame CCD digital camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 1025-1028.
- [7] 高志山.光学系统的杂光计算分析[J].光学精密工程,1992(2):1-5.  
GAO Z S. Stray light analysis of optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 1992(2): 1-5.
- [8] 潘京生.微通道板及其主要特征性能[J].应用光学,2004,25(5):25-29.  
PAN J S. Microchannel plates and its main characteristics [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(5): 25-29.
- [9] 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.  
LIU N W, CHANG L H, XIAO Z F, et al. Measuring gating time of gated image intensifier [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(10): 2447-2450.
- [10] 蔡厚智,刘进元,牛丽红,等.微通道板中电子时间倍增特性的数值模拟[J].强激光与粒子束,2009,21(10):1542-1546.  
CAI H Z, LIU J Y, NIU L H, et al. Theoretical simulation of electron transit time and gain characteristics in micro-channel plate [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10): 1542-1546.

## An Ultra-High-Speed Electro-Optical Framing Camera and Its Application

LIU Ning-Wen, LI Jian, ZHAO Xin-Cai, XIAO Zheng-Fei, LI Ze-Ren

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China*)

**Abstract:** We developed an ultra-high-speed electro-optical framing camera using high precision and low aberration optical subdivision, high precision delay, ultra-fast microchannel plate (MCP) exposure shutter and CCD image data acquisition system, with its performance indicators as the following: its image spatial resolution is  $36 \text{ mm}^{-1}$ , its frame size is  $1600 \times 1200$ , and it can capture eight images with the photography frequency of  $2 \times 10^8$  frame/s. Using this camera, we successfully obtained clear images of the luminescent process of the tungsten wire and the rupture process of the detonator.

**Key words:** photoelectronic imaging; digital camera; high speed photography; frame