

doi:10.3788/gzxb20154406.0611001

一种用于距离选通的 ICCD 设计与实现

何欢^{1,2}, 田进寿¹, 温文龙¹, 王俊锋¹, 刘虎林¹, 赛小锋¹,
韦永林¹, 辛丽伟¹, 李力舟³

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 亳州师范高等专科学校 理化系, 安徽 亳州 236800)

摘 要:研制了一种短余辉、高分辨率、快时间响应的高速选通超二代像增强器,通过光纤锥与 CCD 进行耦合成高性能距离选通 ICCD,理论分析各部件的性能及其对系统空间分辨率的影响;采用 FPGA 设计电路控制系统,该系统产生出纳秒级的选通门宽以实现 ICCD 的数字控制,同时可以对选通脉冲宽度和延时时间进行调整以实现不同亮度以及距离目标的清晰成像,降低背景噪音以及增大成像的动态范围,此外,该系统具有增益监控和调节功能,信噪比达到 20 : 1 dB,在超二代像增强器阴极和微通道板输入面之间加幅度为 -200 V、宽度为 3 ns 直流连续可调的选通脉冲以实现增强器的选通,为了提高光电阴极补充电子的速度,在输入窗内表面光刻有线宽为 5 μm 、间距为 50 μm 正方形格栅以保证选通门宽为 3 ns 时光电阴极有足够快的响应速度,选通频率最高可达到 300 kHz,实验测试在微通道板电压为 700 V、荧光屏电压为 5 000 V 时增强器增益可达 10 718 $\text{cd}/\text{m}^2 \text{lx}$,ICCD 系统空间分辨率达到 29.7 lp/mm.

关键词:成像系统;距离选通;FPGA;ICCD;光纤锥耦合;分辨率;选通门宽;增益控制

中图分类号:TN223

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)06-0611001-6

The Design and Implementation for a Range-gated ICCD

HE Huan^{1,2}, TIAN Jin-shou¹, WEN Wen-long¹, WANG Jun-feng¹,
LIU Hu-lin¹, SAI Xiao-feng¹, WEI Yong-lin¹, XIN Li-wei¹, LI Li-zhou³

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Bozhou Teachers College, Department of Physics and Chemistry, Bozhou, Anhui 236800, China)

Abstract: A high-speed gated second generation image intensifier which is of short afterglow, high resolution and fast response time was designed. A high performance range-gated ICCD was obtained by coupling a fiber taper to CCD. The performance of each component and their effects on the system spatial resolution were analyzed. FPGA was employed to design the circuit control system which can achieve digital control for ICCD by producing a nanosecond gating width. The system can also obtain clear images of objectives in different brightness and distance by adjusting the pulse width and delay time. In addition, the background noise was reduced and the dynamic range of imaging was increased. The gain of this system can be monitored and adjusted to reach a signal-noise ratio of 20 : 1 dB. A gating DC pulse with voltage of -200 V and width of 3 ns-DC continuously adjustable was applied to achieve image intensifier gating. In order to improve the supplement speed of electrons to the photocathode, a square grid which has 5 μm line width and 50 μm spacing lithography was equipped to the input window surface. This also

基金项目:国家自然科学基金(No. 11274377)和国家自然科学基金青年基金(No. 11304374)资助

第一作者:何欢(1990-),女,硕士研究生,主要研究方向为超快诊断技术. Email:hehuan_hehuan@163.com

导师(通讯作者):田进寿(1970-),男,研究员,博士,主要研究方向为超快诊断技术. Email:tianjs@opt.ac.cn

收稿日期:2014-12-23;录用日期:2015-03-31

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

ensured that the photocathode response speed is fast enough when the gating width is 3 ns. The highest gating frequency can reach to 300 kHz. The experimental test shows that the gain of the image intensifier is $10\,718\text{ cd/m}^2\text{ lx}$ when Microchannel Plate voltage is 700 V and phosphor screen voltage is 5 000 V, the system spatial resolution is 29.7 lp/mm.

Key words: Imaging system; Range-gating; FPGA; ICCD; Optical fiber coupling; Image resolution; Gate width; Gain control

OCIS Codes: 110.0110;110.2350;110.2990; 111.3000

0 引言

距离选通^[1-2]成像系统利用脉冲激光器和选通成像设备,以时间的先后分开不同距离上的散射光和目标的反射光,使得目标反射的辐射脉冲刚好在选通成像设备工作的时间内到达相机并成像,有效消除后向散射和背景光的影响,显著改善成像质量,广泛应用于微光成像、天文观测、医疗器械等诸多领域.选通门宽和重复频率对于距离选通成像有重要意义,窄的选通快门可避免高速运动时多个时刻的目标信息叠加形成拖拽的模糊像质,确保快门开启时只接受单一时刻的图像信息,捕获下单幅短暂的变化过程,实现对高速运动物体的成像;重复频率是像增强器及其快门的响应频率,每帧图像是多次像增强器快门的叠加成像,在 CCD 积分时间一定的条件下,高的重复频率可使成像时每帧图像获取较多的图像信息;应用于距离选通的增强电荷耦合器件(Intensified CCD, ICCD),在国外研究已经很深入,并且制造技术非常成熟,如英国 Andor 公司的 DH-334 型 ICCD 最小门宽可达 2 ns;但国内比较成熟的选通式 ICCD 最小选通门宽基本在 40 ns 左右,为此进一步研制高性能距离选通 ICCD 及其控制电路对于提高成像质量,降低背景噪音具有重大意义.为了提高距离选通 ICCD 的空间分辨率及选通门宽等性能,本文分析了 ICCD 器件各组成部件及光纤锥耦合厚度对空间分辨率的影响,研制了用于距离选通的 ICCD,设计了选通控制电路使 ICCD 选通门宽可达 3 ns,重复频率最高可达 300 kHz,实现高速成像.

1 距离选通成像系统工作原理

距离选通成像系统的工作原理如图 1 所示,激光器向目标发射强窄脉冲,同时给出一路同步触发信号,目标反射的脉冲光被 ICCD 接收,当光脉冲在往返途中时 ICCD 选通门关闭,大气中悬浮颗粒产生的后向散射光以及背景杂散光被屏蔽,ICCD 的选通门在反射光到达 ICCD 的瞬间开启,目标的有用信号进入 ICCD;同时距离选通控制电路在接收到同步触发信号时,根据用户通过远程通讯模块设定的增益、距离、景深、频率等参量,经 FPGA 内部逻辑阵列控制 ICCD 选通门开启和关闭,接收目标景物信息,并将图像信息通过成像系统传递给计算机,并反馈当前距离选通电路的监控参量,实现对 ICCD 的实时监控.

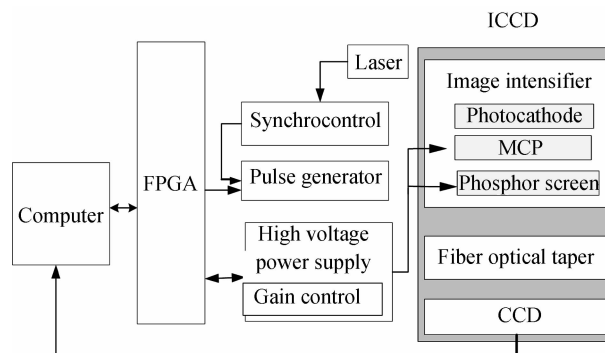


图 1 距离选通成像系统工作原理

Fig. 1 Block diagram of range-gated image system

1.1 ICCD 设计

ICCD 作为距离选通成像系统的核心器件对系统性能起决定作用,其主要结构是在 CCD 前耦合像增强器,利用像增强器能在很短时间内打开或关闭来实现纳秒级选通. ICCD 是由分立元件集成的,因此各元件的性能、耦合工艺及电路系统都会对 ICCD 系统性能产生影响^[3-4].

为便于选通,采用双近贴聚焦结构的像增强器.输入窗采用防光晕硅硼玻璃,输出窗采用光纤面板以便于和 CCD 实现耦合.为了提高光电阴极补充电子的速度,在输入窗内表面光刻线宽 $5\ \mu\text{m}$ 、间距 $50\ \mu\text{m}$ 正方形格栅以保证选通门宽 3 ns 时光电阴极有足够快的响应速度^[5];光电阴极选用 S25 阴极以保证在 $400\ \text{nm}\sim 800\ \text{nm}$ 的光谱范围内有较高的光谱灵敏度^[6];选用余辉时间为 1.43 ms P43 荧光粉以保证成像速度 500 帧/秒以上 ICCD 的使用,如果要实现更高的成像帧频可选用屏效较低但余辉时间更短的 P46 或 P47 荧光粉^[7].

微通道板(Microchannel Plate, MCP)采用孔径 $5\ \mu\text{m}$ 、长径比 40 : 1 的成像级微通道板,光阴极与 MCP 输入面之间距离为 $0.2\ \text{mm}\sim 0.3\ \text{mm}$, MCP 输出面与荧光屏距离为 $0.5\ \text{mm}$.通过增加 MCP 两端电压,可使经倍增得到的粒子数目增多,增大光增益,但 MCP 通道中残余的气体会在电场的作用下电离形成背景噪音^[8-9],为了降低 MCP 产生的背景噪音, MCP 最大工作电压不得超过 1000 V,通常推荐的最佳工作电压为 $700\ \text{V}$ ^[10].实验测试当 MCP 电压为 700 V、荧光屏电压为 5 000 V 时增强器增益为 $10\,718\text{ cd/m}^2\text{ lx}$,空间分辨率为 40 lp/mm,积分灵敏度为 $720\ \mu\text{A/lm}$,信噪比为 20 dB.如图 2 所示,左图为超二代双近贴式像增强器裸管,右图则为其供电电源.

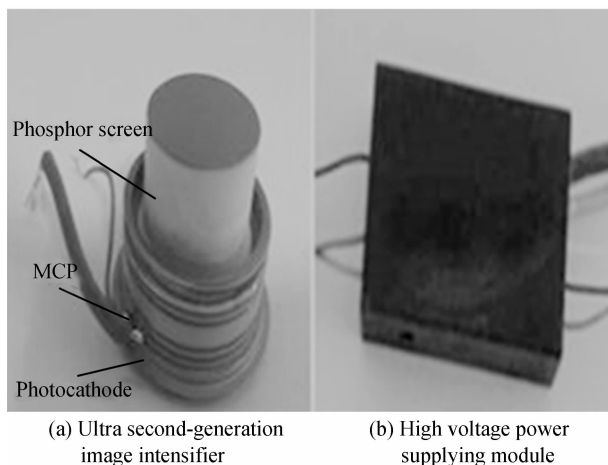


图2 超二代微光像增强器裸管及其供电电源
Fig. 2 Ultra second-generation image intensifier and power supply

供电电源除提供各电极所需稳定电压外,还具有自动亮度控制和强光保护功能,以确保荧光屏亮度保持稳定和保护光电阴极在高照度下免受损坏。

1.2 耦合光纤锥

像增强器与 CCD 采用光纤锥耦合^[11],像增强器输出窗为圆形,光纤面板直径为 22 mm,有效成像面积为 $\Phi 18$ mm,CCD 感光面为 6.4 mm \times 4.8 mm 的矩形。像增强器与 CCD 耦合方式示意图如图 3 所示,光纤锥前端外径与荧光屏的光纤面板直径相同;光纤锥变径比为 2.25 : 1,光纤锥后端打磨成尺寸为 6.4 mm \times 4.8 mm 且具有负公差的矩形以实现与 CCD 感光面粘接耦合。这种耦合方式充分利用 CCD 感光面,分辨率高,但会损失一部分视场,图 3 中阴影部分即为将要丢失的图像信息,可通过调整 ICCD 前端的镜头,使目标全部成像在 CCD 感光区域。

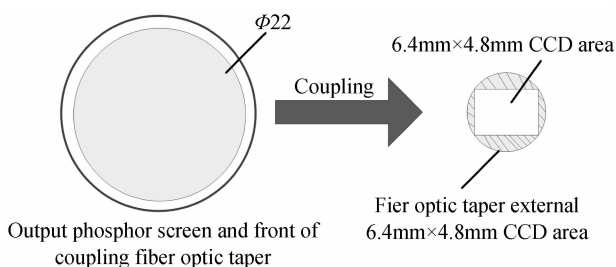


图3 像增强器与 CCD 耦合方式示意图
Fig. 3 Image intensifier and CCD coupling schematic

采用大数值孔径的光锥,减小光纤锥直径,提高光锥的透过率以及减小端面的反射损耗来提高光锥与 CCD 的耦合效率^[12],此外,耦合过程中光锥两端的耦合间隙也会降低耦合效率以及空间分辨率。为提高耦合效率,此系统采用的光纤锥直径为 6 μ m,光纤锥分辨率可达 96 lp/mm;数值孔径为 1;耦合界面采用折射率与光锥折射率相近的耦合油,消除增强器输出面板与耦合光锥之间的空气隙,降低耦合界面的光线反射,

既提高了光的耦合效率又能保证了 ICCD 具有较高的空间分辨能力。

1.3 ICCD 空间分辨率的理论计算

空间分辨率对系统性能起决定作用,ICCD 空间分辨率取决于像增强器、光纤锥、CCD 等器件的性能及耦合工艺。

选用 1/2"CCD 探测器,其分辨率 1 360 \times 1 024,像元尺寸 4.65 μ m \times 4.65 μ m,帧率 20 fps,AD 转换准确度 12 bit,信噪比 60 dB,采用全帧曝光方式。

像增强器的分辨率 40 lp/mm,像元尺寸 12.5 μ m,有效成像面积 $\Phi 18$ mm,CCD 尺寸为 1/2",光锥比例为 2.25。空间分辨为 40 lp/mm 的像增强器映射到 CCD 靶面上可分辨的最小尺寸为 5.56 μ m,比 CCD 本身可分辨单元 4.65 μ m 要大,因此对该 ICCD 来说,增强器空间分辨率是限制整个 ICCD 系统空间分辨的主要因素。

除上述因素制约 ICCD 空间分辨率外,增强器与光锥之间的间隙、光锥与 CCD 感光面之间的间隙都会对其造成影响,各因素对 ICCD 分辨率的影响可表示为

$$R_{\text{ICCD}}^{-2} = R_{\text{像管}}^{-2} + R_{\text{前间隙}}^{-2} + R_{\text{光纤锥}}^{-2} + R_{\text{后间隙}}^{-2} + R_{\text{CCD}}^{-2} \quad (1)$$

式中, R_{ICCD} 为 ICCD 总的空间分辨率; $R_{\text{像管}}$ 为像增强器空间分辨率,本文实测 $R_{\text{像管}}$ 为 40 lp/mm; $R_{\text{前间隙}}$ 为像增强器输出窗与光纤锥前端耦合间隙的分辨率, $R_{\text{后间隙}}$ 为 CCD 与光纤锥后端耦合间隙的分辨率, $R_{\text{光纤锥}}$ 为光纤锥的分辨率, R_{CCD} 为 CCD 的分辨率。

计算 ICCD 系统空间分辨率时应将各个器件换算到同一基准面,此处将阴极作为分辨率基准面。

CCD 相机的极限分辨率由其像元尺寸所决定, $R_{\text{CCD}} = 1/2a$,其中 a - CCD 像元尺寸,本文 CCD 像元尺寸为 4.65 μ m \times 4.65 μ m,填充率为 1,因此水平和垂直方向像元间隔 $a = 4.65 \mu$ m,故 CCD 分辨率为 107.53 lp/mm。

ICCD 耦合过程中光锥两端存在厚度为 $d = 0.01$ mm 的耦合间隙,导致荧光屏输出图像及光纤元件输出图像分别离焦,每一间隙的分辨率为

$$R_{\text{间隙}} = 0.8/d = 80 \text{ lp/mm} \quad (2)$$

根据式(1)计算得 ICCD 空间分辨率理论值为 32.29 lp/mm。

2 电路控制系统设计

电路控制系统通过可编程 FPGA 作为核心控制器件来实现。电路控制系统主要由同步控制模块、选通快门模块、增益控制模块、增益监控模块、低压供电模块、高压供电模块和远程通讯模块等组成,电路原理如图 4。FPGA 采用 Xilinx 公司的 Spartan 系列的 XC6SLX9 芯片。

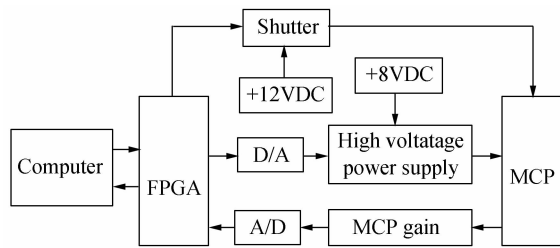


图 4 电路原理框图

Fig. 4 Block diagram of the circuit

2.1 同步控制电路设计

通过 Verilog HDL 语言^[13]实现纳秒量级的距离选通同步控制电路^[14],可根据不同情况置入距离和脉宽数值,准确度可达 10 ns,置入的距离延迟时间和选通门宽时间存放在寄存器中. 50 MHz 的系统晶振经 FPGA 内部锁相环 PLL 模块产生倍频时钟,当接收到触发信号时,启动延时模块的定时器,计数器以距离延迟时间为初始值开始递减计数,当从目标反射回的光脉冲到达 ICCD,距离延时计数结束时产生距离选通脉冲打开 ICCD 选通门,目标反射光进入 ICCD,选通门开启时间与门宽预设值一致.

2.2 选通快门设计

快门采用阴极常闭型加载方式,如图 5 所示,通常情况下像增强器的阴极加 +30 V 偏置电压使其处于关闭状态,即使有光照,由于光电子处于反向电场,阴极上发射的电子不能到达 MCP,荧光屏也不会有输出;选通时加 -200 V 的选通电压使像增强器打开并选通出一定门宽的光脉冲. 为精确控制像增强器选通,选用的快门主要技术指标如表 1 所示,选通门宽最窄

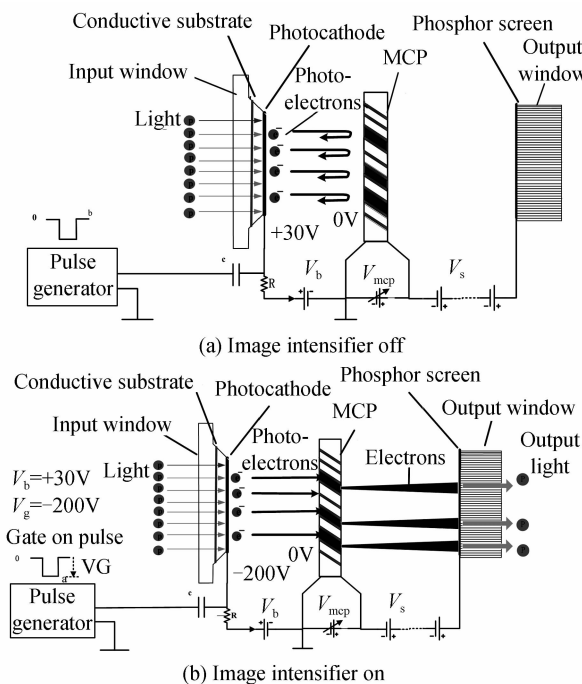


图 5 快门加载方式

Fig. 5 Shutter loading

表 1 快门主要技术指标

Table 1 Shutter major technical indicators

Technical indicators	
Gate time	3ns-DC
Repetition frequency	300 kHz
Trigger delay	10 ns
Trigger input	>+3.2 V@50 ohm
Power supply	+12 VDC/0.55 A
Power consumption	6.6 W

可达 3 ns, 重复频率可达 300 kHz.

2.3 MCP 增益控制

增益控制模块主要通过 12 bit 的 D/A 来实现,控制准确度可达 $1/2^{12}$. FPGA 将接收到的计算机串口发来的数据转换为控制 D/A 芯片的时序信号,D/A 的输出电压控制加在 MCP 上的高压转换模块,从而改变 MCP 增益^[15],同时实现对 MCP 电压的监控功能,A/D 芯片将采集到的 MCP 电压信号转换为数字信号,经由 FPGA 进行数据处理,转换为实际的 MCP 电压值,最后通过通讯模块传送给控制计算机,显示在用户界面中.

3 系统性能测试

距离选通 ICCD 实验样机核心部件如图 6 所示,主要包括 ICCD、选通快门及控制电路. 对 ICCD 的分辨率测试采用平行光管投影分化板,测得 ICCD 空间分辨率如图 7 所示,在像增强器增益 2.8 V,快门重复频率 100 kHz,选通门宽 40~70 ns 变化范围内,分刻板图案每 4 个为 1 组最大可看到第 16 组上出现明暗相间的条纹,据栅格状鉴别率图案的换算表得 ICCD 极限空间分辨率为 29.7 lp/mm,与理论计算空间分辨率 32.29 lp/mm 接近;分别选取 125 ns,31 ns 和 3 ns 的

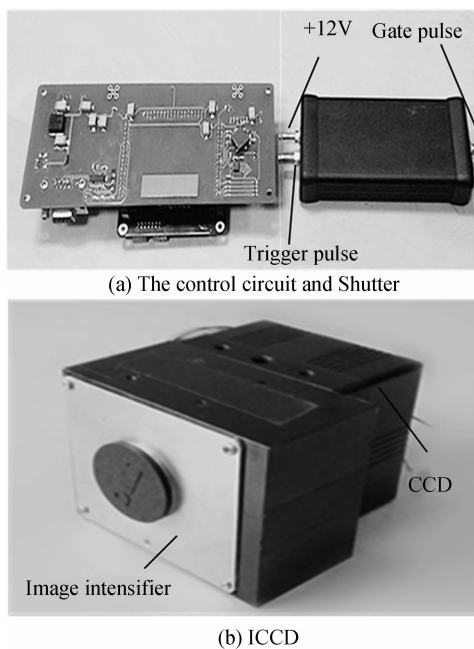


图 6 距离选通 ICCD 成像系统实物图

Fig. 6 Photo of range-gated ICCD

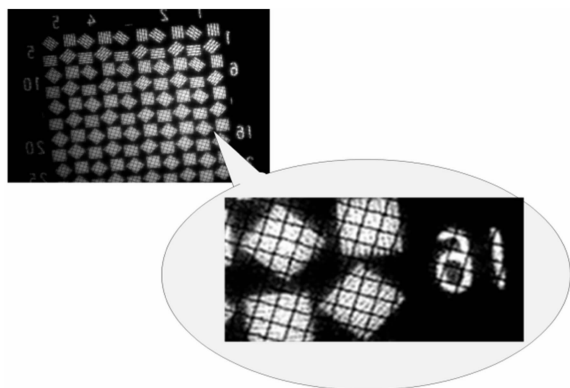
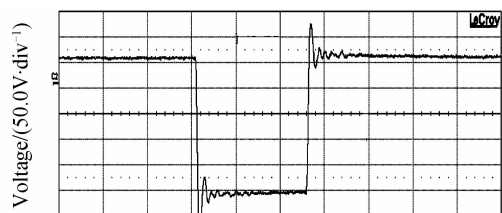
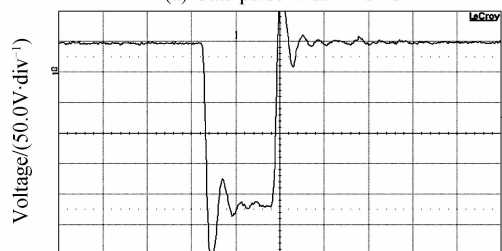


图 7 ICCD 空间分辨率测试图
Fig. 7 Spatial resolution of ICCD

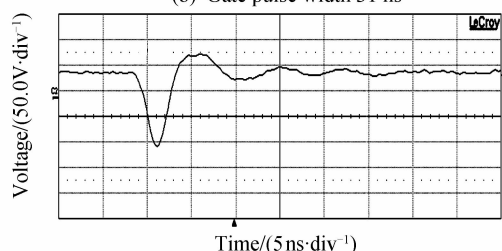
选通门宽,通过示波器观察相应电脉冲波形如图 8. 快门重复频率最快可达 300 kHz,波形如图 9.



(a) Gate pulse width 125 ns



(b) Gate pulse width 31 ns



(c) Gate pulse width 3 ns

图 8 选通脉冲波形

Fig. 8 Waveforms for gate pulse width

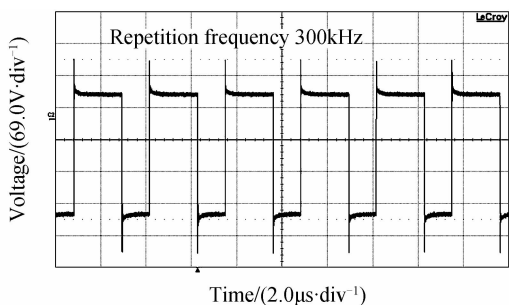


图 9 快门重复频率 300 kHz

Fig. 9 Shutter repetition frequency 300 kHz

P43 荧光粉余辉时间曲线如图 10 所示,亮度降低到峰值的 10% 所用时间为 1.43 ms;MCP 电压 700 V、荧光屏电压 5000 V 时增强器增益最大可达 10 718 cd/m²lx;光谱响应范围、固有延时及触发晃动等参量如表 2 所示.

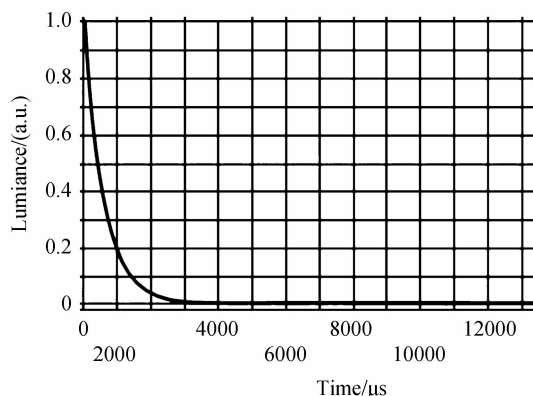


图 10 P43 荧光粉余辉时间曲线

Fig. 10 Decay time of P43 phosphor

表 2 选通型 ICCD 性能参量

Table 2 Gated ICCD performance parameters

Technical indicators	
Maximum gain	10 718 cd/m ² lx
Spectral range	450~800 nm
Inertial delay	50 ns
Trigger jitter	<50 ps
Imaging frame rate	20 fps

由测试结果可知,设计的 ICCD 满足了实验过程中距离选通的要求;极限空间分辨率接近 30 lp/mm 可满足清晰成像要求;选通快门达到了 3 ns-DC,使系统可捕获到纳秒级运动变化,实现对高速运动物体的成像;快门重复频率为 300 kHz;窄门宽高重频有效降低了图像噪音(快门关闭期间不会形成背景噪音的积累,有利于提高信噪比);ICCD 成像帧频由耦合的 CCD 帧频决定,为 20 fps;P43 荧光粉的选用保障了 ICCD 的成像帧频;采用 FPGA 控制电路,精确控制 ICCD 选通门的开启和关闭,调整延时时间可实现对不同距离目标成像,延时准确度可达 10 ns, MCP 增益可控并能实时监控.

4 结论

本文采用超二代像增强器与 CCD 通过光纤锥耦合高性能距离选通 ICCD,分析各部件性能及其对 ICCD 空间分辨率的影响.设计的控制电路最小选通门宽 3 ns,可记录纳秒级运动变化;选通脉冲宽度和延时时间的实时调整实现不同亮度及距离目标的清晰成像,降低背景噪音以及增大成像的动态范围;系统具有增益监控和调节功能实现增益的实时控制.对系统性能参量进行了表征:空间分辨率 29.7 lp/mm,最小选

通门宽 3 ns, 重复频率可达 300 kHz; 对距离选通 ICCD 的实用化有重要意义。

参考文献

- [1] BONNIER D, LAROCHELLE V. A range-gated active imaging system for search and surveillance operations [C]. SPIE, 1996, **2744**: 134-145.
- [2] SNELL K J, PARENT A, LEVESQUE M, *et al.* An active range-gated near-IR TV system for all-weather surveillance [J]. SPIE, 1997, **2935**: 171-181.
- [3] CUI Zhi-gang, BAI Ting-zhu, GAO Zhi-yun. Analysis for the resolution change of ICCD caused by fiber optic taper coupling [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(6): 802-805.
崔志刚, 白廷柱, 高雅允. 光锥耦合对 ICCD 成像系统分辨力的影响分析[J]. 光学技术, 2008, **34**(6): 802-805.
- [4] YIN Hao, LIU Guang-rong, JIN Wei-qi, *et al.* Analysis for the resolution of intensifier CCD imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(Supplement): 96-100.
阴浩, 刘广荣, 金伟奇, 等. 像增强型 CCD 成像系统的分辨力分析[J]. 光子学报, 2010, **39**(增刊): 96-100.
- [5] LI Jia, PANG Qi-chang, PENG Wen-da, *et al.* Gatable image intensifier with a new type of conduct electricity substrate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(9): 861-864.
李佳, 庞其昌, 彭文达, 等. 选通式象增强器的新型导电基地 [J]. 光子学报, 2000, **29**(9): 861-864.
- [6] LI Xiao-feng, SONG Kai-jun, LIU Ru-biao, *et al.* Fluorescence spectrum of Na₂KsB (Cs) multi-alkali photocathode of the Gen II + image intensifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1459-1463.
李晓峰, 宋开俊, 刘如彪, 等. 超二代微光像增强器 Na₂KsB (Cs) 多碱光电阴极荧光光谱研究 [J]. 光子学报, 2011, **40**(10): 1459-1463.
- [7] CHRZANOWSKI K. Review of night vision technology [J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, **21**(2): 153-181.
- [8] ZHANG Xing-hua, ZHAO Bao-sheng, LIU Yong-an, *et al.* Gain characteristic of ultraviolet single photon imaging system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1779-1784.
张兴华, 赵宝升, 刘永安, 等. 紫外光电子成像系统增益特性研究 [J]. 物理学报, 2009, **58**(3): 1779-1784.
- [9] TIMOTHY J G. Microchannel plates for photon detection and imaging in space [J]. *ISSE*, 2010, **SR-009**: 391-421.
- [10] PAN Jing-sheng, YUAN Lu, XIAO Hong-liang, *et al.* Influence analysis of saturation effect of microchannel Plate on dynamic range of streak camera [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(19): 194211: 1-7.
潘京生, 元鲁, 肖洪亮, 等. 微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析 [J]. 物理学报, 2012, **61**(19): 194211 1-7.
- [11] XIN Fu-xue. ICCD fiber coupling technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, **30**(3): 210-213.
辛福学. ICCD 的光纤耦合技术 [J]. 红外与激光工程, 2001, **30**(3): 210-213.
- [12] WANG Yao-xiang, TIAN Wei-jian, HUANG Kun, *et al.* The theoretical analysis for the efficiency of fiber optic taper coupled with CCD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 318-321.
王耀祥, 田维坚, 黄琨, 等. 光锥与 CCD 耦合效率的理论分析 [J]. 光子学报, 2004, **33**(3): 318-321.
- [13] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [14] HE Shan, ZHOU Yan, FAN Song-tao, *et al.* Range-gated synchronization control circuit design based on FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(Supplement): 178-181.
何杉, 周燕, 范松涛, 等. 基于 FPGA 的距离选通同步控制电路设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(增刊): 178-181.
- [15] WU Li-na, WEN Wen-long, XU Xiang-yan. The design of FPGA circuit for controlling ICCD [J]. *Microprocessors*, 2012, **1**: 17-19.
吴丽娜, 温文龙, 徐向晏. 利用 FPGA 实现 ICCD 控制电路 [J]. 微处理机, 2012, **1**: 17-19.