

doi:10.3788/gzxb20184709.0911001

ICCD 选通脉冲源的设计与实验研究

虎俊宇^{1,2}, 裴承全¹, 田进寿¹, 王俊锋¹, 方玉熿^{1,2}, 温文龙¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于微处理器并结合模拟延迟电路以及数字逻辑电路, 设计了分辨率可达 5 ns、最小脉宽为 65 ns、频率高达 1 MHz、且通过上位机可以远程控制的选通脉冲源. 用该脉冲源结合选通电源测试了阴极上镀有金属导电基底和没有金属导电基底的 ICCD 的选通快门时间. 结果表明当镀有金属基底时, ICCD 具有更短的开启时间. 建立相应的等效电路模型和阴极开关过程满足的 RC 等效方程, 定性分析得出阴极面电阻的减小是使得 ICCD 开启时间缩短的主要因素.

关键词: ICCD; 脉冲发生; 脉冲整形; 比较器; 选通门宽; 光阴极

中图分类号: TN782

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)09-0911001-8

Design and Experimental Study of ICCD Gated Pulse Source

HU Jun-yu^{1,2}, PEI Cheng-quan¹, TIAN Jin-shou¹, WANG Jun-feng¹,
FANG Yu-man^{1,2}, WEN Wen-long¹

(1 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)

Abstract: Based on the microprocessor and combined with analog delay circuit and digital logic circuit, a strobe pulse source with a resolution of 5 ns, a minimum pulse width of 65 ns, a frequency up to 1 MHz, and remote control by the host computer is designed. Using this pulse source in combination with a gate power supply, the gated shutter time of the ICCD coated with a metallic conductive substrate and no metallic conductive substrate on the cathode are tested. The results show that the ICCD has a shorter turn-on time when metal substrates are plated. The corresponding equivalent circuit model and the RC equivalent equation which the opening and closing process of photocathode met are established, qualitative analysis shows that the decrease in the cathode surface resistance is the main factor to shorten the ICCD open time.

Key words: ICCD; Pulse generation; Pulse shaping; Comparators; Gate width; Photocathode

OCIS Codes: 110.4155; 110.4190; 320.0320; 320.5550; 320.5550; 320.4240

0 引言

增强电荷耦合器件(Intensified Charge-Coupled Device, ICCD)是将像增强器与电荷耦合元件(Charge-Coupled Device, CCD)通过光学耦合或光纤耦合得到的增强电荷器件. 具有工作电压低、重量轻、解析度高、信噪比高、光谱响应范围宽等诸多优点, 在夜视导航、弱光检测成像、遥感遥测、生物医学等微光成像领域中有广泛的应用^[1-4].

在超快现象诊断领域, ICCD 作为超高速分幅相机的核心成像器件, 其工作方式是由多个 ICCD 在选通脉冲源的控制下依次打开而实现的^[3]. 选通脉冲脉宽调节的精度决定了分幅相机在单位时间内最多能拍摄

基金项目: 国家自然科学基金(No.41530422)和中国科学院创新基金(No. CXJJ-16S015)资助

第一作者: 虎俊宇(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分幅相机快门控制. Email: 990470793@qq.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: 2018-04-23; **录用日期:** 2018-06-25

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

的图像数^[4].其最短脉宽决定了 ICCD 相机的快门打开速度.而更高的重复频率可以让分幅相机在一定的 CCD 曝光时间内获得更多的图像信息,从而使得相机在弱光条件下依然可以实现图像的正常拍摄.

目前,大多数 ICCD 选通脉冲发生器的脉宽调制采用的方式多为利用时序计数产生占空比可调的脉宽调制波(Pulse Width Modulation, PWM)实现,这种方式因为局限于计数时钟本身的频率上限而无法进一步提升精度.另一种方法通过两片模拟延时芯片对参考信号进行两路延时后分别作为输出脉冲的上升沿和下降沿,输出到锁存器进行逻辑运算,以实现高精度的脉宽调制,但这种方式的电路复杂,走线难度高,容易引入不确定因素,使得信号抖动上升^[5].在重复频率这一方面,多数分幅相机在较短的选通门宽内的重复频率都只能达到千赫兹级别,无法满足 ICCD 相机在弱光条件下或者时间分辨率较高的诊断场合.例如荷兰 Lambert 公司的高速相机 HiCAM5000,其脉冲宽度最小可以达到 40 ns,脉宽调节精度为 20 ns,重复频率最大为 100 kHz;德国 PCO 公司的 hsf-c-pro 分幅相机,其最短脉冲宽度可以达到 3 ns,但其脉宽调节精度只能达到 10 ns,20 ns 门宽内的重复频率仅有 3 kHz;德国 Lavison 公司的 Nanostar 高速相机其最小脉宽达到 5 ns,脉宽调节步进最高仅为 10 ns^[6-8].综上所述,高频率的输出脉冲只能实现较低的脉宽调整分辨率,较高的脉宽调节分辨率只能工作在低频模式下.上述工作,仍不能满足物理实验中超快诊断的需求.

因此,设计实现一款高脉宽调节精度的 ICCD 选通脉冲源,对于提高高速分幅相机的关键性能具有重要意义.利用恒温晶振产生 7 MHz 的矩形波,再通过微处理器控制分频器并结合模拟和数字逻辑电路,设计分辨率 5 ns、最小脉宽 65 ns、重复频率可达 1 MHz 的可通过上位机远程控制的选通脉冲源,以克服高重复频率的条件下脉宽调节精度不高的问题,对 ICCD 的光阴极做理论建模和分析,并进行实验测试.

1 选通脉冲源的设计与实现

1.1 硬件系统架构

目前大多数的脉冲展宽都是通过数字程控芯片或者数字逻辑芯片搭建的逻辑电路实现的,但是这种方法精度不高、且输出信号晃动较大^[9-11].采用对基准方波的上升沿和下降沿分别比较整形的手段,实现对脉冲的展宽.

如图 1,对于基准信号 Time base,其在 A 时刻与 B 时刻对应着不同的幅值,可以将不同时刻的幅值作为比较器的门限值与高精度数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)产生的信号进行比较,实现脉冲展宽.由于恒温晶振具有极高的稳定性,基准脉冲(Time base)用恒温晶振产生以消除基准信号的晃动和飘移,大大提高了输出脉冲的稳定性;采用轨到轨的高精度比较器 TLV3501 提高脉冲展宽的精度以及输出信号的稳定性.

具体实现方式如图 2,为将上位机控制高精度 DAC 输出固定幅值的信号输入比较器一端,基准门限信号输入比较器另一端,最终输出脉宽调制后的脉冲信号.为了使整个系统工作在兆赫兹的频率下,且实现相对较高的脉冲宽度调节范围和调节精度,相比于传统的采用处理器内部晶振产生脉冲的方式,

对恒温晶振输出的脉冲做变频可得到 0~7 MHz 内的任意信号,且具有较高的稳定性和可靠性;此外,电源纹波、DAC 的输出精度、比较器的反映速度、压摆率以及系统的噪声都是主要的影响因素.设计中采用了 24 位 DAC,其输出的电压精度可达到 50 mV;为消除电源纹波的影响,采用了基准源结合隔离 DC-DC 的供电方式使纹波精度达到 0.01%,采用差分信号的走线方式有效消除了共模噪声的影响.通过低纹波的供电、高精度的比较以及差分信号的处理有效地降低了干扰,提高了比较精度和调整的分辨率.为了减小晃动的干

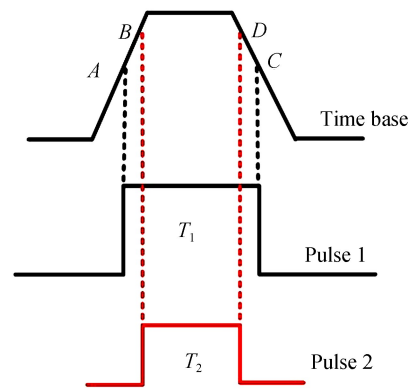


图 1 脉冲宽度调制原理

Fig.1 Pulse width modulation principle

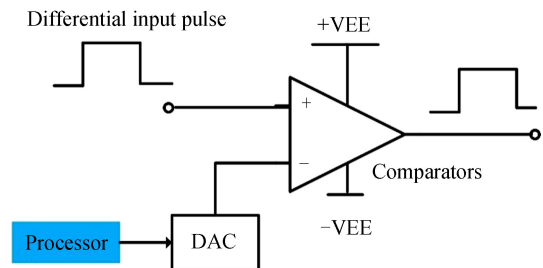


图 2 脉宽调制实现

Fig.2 Pulse Width Modulation

扰,设计中采用了时间幅值转换技术(Time Amplitude Conversion, TAC)技术,将时域的晃动转换为幅值信息,最后通过补偿的方式实现晃动的校正。

1.2 总体系统架构

整体硬件系统架构如图3所示,脉冲源由恒温晶振、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)、ARM处理器(Advanced RISC Machine, ARM)、以及负责脉冲整形的DAC镜像电流源、高精度比较器组成,通过TCP/IP协议与上位机进行通讯。

恒温晶振产生频率为7 MHz的基准信号,镜相电流源和比较器是TAC技术的核心部分,用于提高输出信号的稳定性和减小时间上的晃动.ARM处理器嵌入了Win CE的操作系统,通过TCP/IP协议与外部进行通信,FPGA接收来自ARM处理器的数据,利用计数器延时法实现大动态范围的脉宽调整,并将需要精密脉宽调节的部分转为脉冲信号幅值的数字信号,经过DAC输出幅度可编程的模拟脉冲,与恒温晶振产生的基准信号进行阈值比较后输出所需脉冲,实现高精度的脉宽调制^[12-14],脉冲信号波形见图4、5。

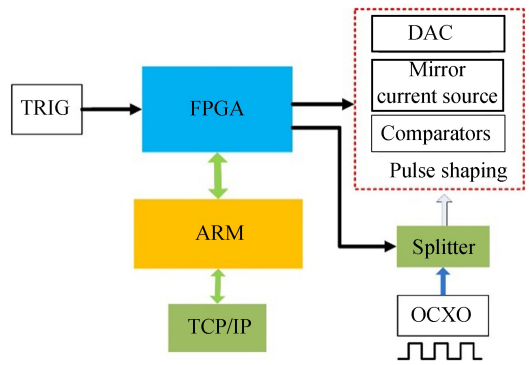


图3 硬件架构

Fig.3 Hardware architecture

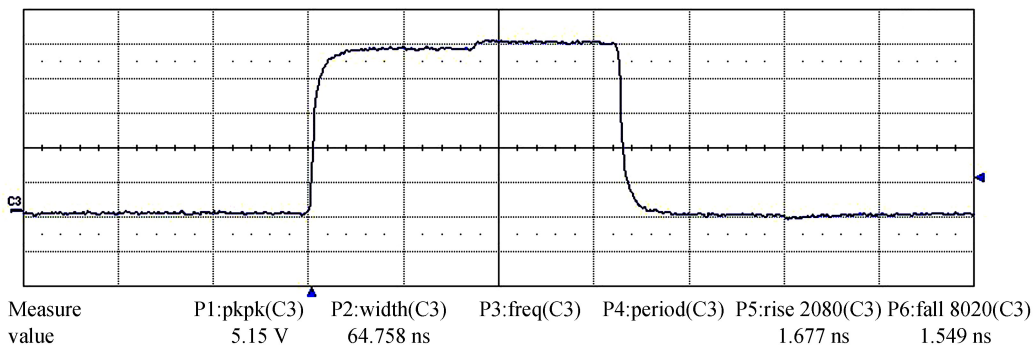


图4 65 ns单脉冲信号波形

Fig.4 65 ns single pulse signal waveform

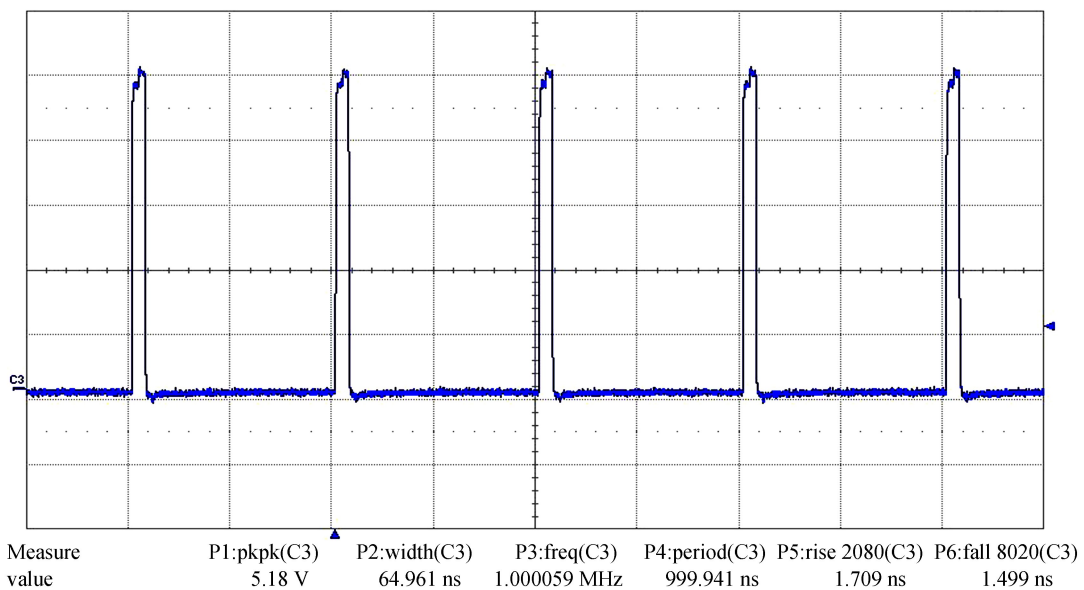


图5 65 ns、1 MHz 脉冲信号波形

Fig.5 Pulse signal waveform with 65 ns and 1 MHz

从测试结果中可知,脉冲源可以实现多脉冲高重复频率的脉冲发生,其最小脉冲宽度为65 ns,重复频率

最高可达 1 MHz.软件基于 C 语言编写,其主要工作流程如图 6.

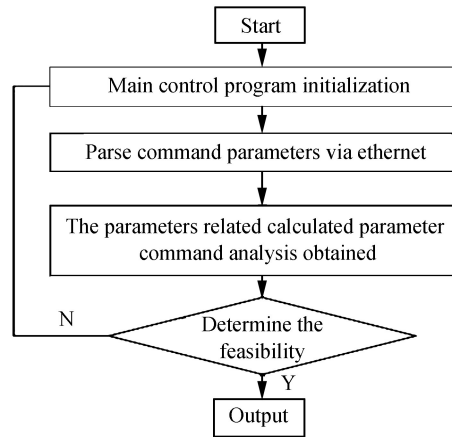


图 6 软件工作流程
Fig.6 Software workflow

打开脉冲源后,主程序控制初始化所有参数,上位机通过 TCP/IP 协议发送指令,脉冲源解析指令得到脉宽和重复频率参数,之后软件通过脉宽与重复频率计算脉冲占空比检测是否可以正常输出脉冲,如果无法正常输出,则将程序重新初始化.

2 ICCD 选通快门的实验研究

2.1 光阴极等效电路模型

实验中采用的 ICCD 光阴极与 CCD 采用光锥耦合的方式,接触电极环位于阴极边缘,光阴极材料为 S20,沿着阴极面方向可以视为均匀导电媒质,基于此,建立等效电路模型分析^[15-16].选取阴极靠近表面处一个闭合曲面,阴极材料的介电常数为 ϵ ,电导率为 δ ,该曲面内空间电荷密度为 ρ ,电流密度为 \mathbf{J} , \mathbf{D} 为电位移矢量,则根据电流连续性方程及媒质的本构关系有

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \delta \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (3)$$

可以得到

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\delta}{\epsilon} \nabla \cdot \mathbf{D} + \mathbf{D} \cdot \nabla \left(\frac{\delta}{\epsilon} \right) \quad (4)$$

由于光阴极为均匀的导电媒质,介电常数和电导率均为常数所以式(4)后一项为 0,根据麦克斯韦方程

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\delta}{\epsilon} \nabla \cdot \mathbf{D} \quad (5)$$

$$\rho = \nabla \cdot \mathbf{D} \quad (6)$$

可以得到

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-\frac{\delta}{\epsilon} t} \quad (7)$$

基于此,可以将阴极等效为一个 RC 并联电路模型如图 7,像增强器的打开过程对于该模型下的阴极可以看成是对阴极电容的充电过程,从而可以得到电容 C 上的电流与电压关系,即

$$U_C = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (8)$$

$$I_C = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (9)$$

从式(8)、(9)可以看出,在阴极介电常数一定的情况下,阴极与像管金属零件之间的电容 C 为常数,因而影响阴极打开时间的的时间常数 τ 仅受阴极面电阻的影响,面电阻越大,对应 RC 模型中的充电时间就越长,即阴极的实际打开时间便越久.具体的过程是:当 ICCD 处于选通工作状态时,光阴极表面会有大量电子

受到瞬间的强辐射激发而发射出去.同时,光阴极通过位于其边缘的接触电极环补充电子,因此阴极表面边缘相对于阴极中心,补充电子的速度会更快.未加导电基底时,阴极自身的高面电阻加剧了阴极中心与边缘电子补充速度这一差距,使得阴极实际开门时间大幅增加.

加在光阴极上的导电基底一般分为导电薄膜和导电栅网两种,导电薄膜,是一个连续均匀的导电层,相对于阴极本身的半导体材料,面电阻要小得

多,一般直接以其面电阻作为金属光阴极的等效面电阻;导电金属栅网的等效面电阻可由 $\rho = \frac{\pi \rho_0}{4N}$ 得到,其中 ρ_0 为光电阴极的表面电阻, N 为阴极有效面积内的总网格数.实验中采用的导电基底为均匀导电薄膜,光阴极与导电薄膜的等效面电阻可以视为光阴极与金属薄膜并联后的阻值,即

$$R_{eq} = \frac{R_p R_M}{R_p + R_M} \quad (10)$$

式中, R_{eq} 为等效电阻, R_p 为光阴极面电阻, R_M 为导电薄膜面电阻.在金属薄膜厚度为 10 nm 时时, $R_p \gg R_M$ [17],所以在加上金属导电基底后,光阴极等效表面电阻可以视为金属薄膜的面电阻.这使得模型中的时间常数 τ 的值远小于未加导电基底的值.

2.2 材料特性对开门时间的分析

传输线矩阵法(Transmission-Line Matrix, TLM)基于惠更斯原理,将连续波按时间离散,研究离散的波在不同导波结构(按空间离散)中的传播情况来获得导波结构的传输特性.由于波的离散是在时域中进行的,因而 TLM 为时域分析法.它用一对对互相联结(并联或串联形成网格)的传输线来模拟所要求解的导波结构,通过研究脉冲(单脉冲或连续脉冲)在网格中的传播获得导波结构的时域响应,传输线上的电压和电流可以等效为电场(或磁场)和磁场(或电场),因而还可同时获得导波结构内的场分布.相较于一般的频域分析方法,线传输矩阵法在本模型中可以直接用于在时域中分析阴极表面电场的建立情况.

利用 CST 软件的微波工作室并采用 TLM 方法建立模型分析薄膜电导率及介质特性对于光阴极开门时间的影响.模型中在光阴极与栅极之间加 3 ns 高斯脉冲激励,观察阴极中心的电场变化情况,结果见表 1,2.

表 1 不同电导率时阴极中心电场变化情况

Table 1 The change of central electric field of photocathode with different conductivity

Conductivity/($s \cdot m^{-1}$)	Electric field strength/($mV \cdot m^{-1}$)	Electric field establishment time/ns
1×10^0	6.169	3.818
1×10^1	27.702	4.722
1×10^2	38.294	5.292
1×10^3	43.683	5.77
1×10^4	44.881	5.765
1×10^5	45.01	5.765
1×10^6	45.023	5.765
1×10^7	45.024	5.765
1×10^8	45.024	5.765

表 2 不同介质介电常数时阴极中心电场变化情况

Table 2 The cathode central electric field changes with different dielectric constants

Dielectric constant	Electric field strength/($mV \cdot m^{-1}$)	Electric field establishment time/ns
1	9.926	3.653
5	11.976	3.692
10	13.127	3.748
100	47.326	5.169

从仿真结果分析可知,在金属导电基底的电导率从 $1 s/m$ 到 $10^8 s/m$ 的变化过程中,阴极中心电场建立

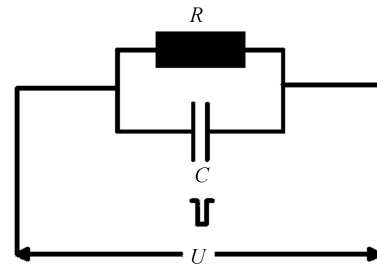


图 7 阴极 RC 等效模型

Fig.7 RC equivalent model of photocathode

时间仅延长了约 2 ns,而中心场强则变化很大,结合已建立的 RC 等效模型,在 3~5 ns 的短时间内,电导率较高的导电基底可以在中心产生更高的场强,在相同的阴极上,更高的场强表明更大的中心电势差,即更快的充放电速度.同样参考介质的相对介电常数变化也可以发现和电导率类似的规律,验证了模型中所述的 $\tau=RC$ 的结论.

2.3 ICCD 选通快门测量实验

采用皮秒激光器产生脉冲标定拍摄阴极打开与关闭时刻的图像.脉冲源产生两路脉冲,一路控制打开像增强器,一路触发激光器输出脉冲,并控制光脉冲移动,具体时序如图 8.

脉冲源控制光脉冲相对另一路脉冲以 5 ns 步长向后移动,每移动一次拍摄一副图像,以此标定 ICCD 的快门打开与关闭的时刻.搭建的测试实验装置如图 9.

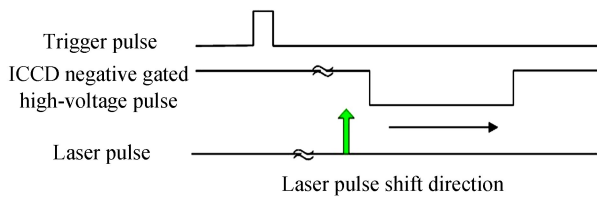


图 8 ICCD 快门测量实验时序

Fig.8 ICCD shutter measurement experiment timing chart

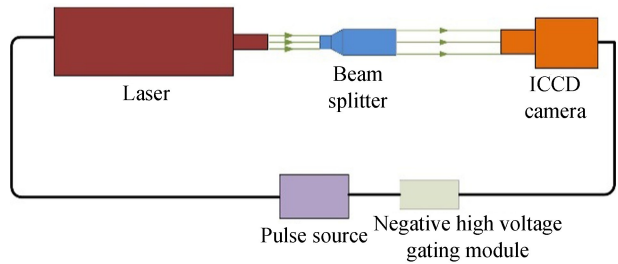


图 9 选通快门时间测试实验

Fig.9 Gated shutter time test experiment

ICCD 采取阴极常闭型快门加载方式,选通脉冲源接负高压模块,脉冲源用以触发像增强器的一路脉宽设置输出 310 ns,经过负高压模块后产生 300 ns 的 -200 V 负脉冲触发打开 ICCD 相机.另一路输出 65 ns 脉冲触发激光器并控制激光器产生的光脉冲移动.利用扩束镜将皮秒激光器发射的激光扩束,使其通过分幅相机的光学成像系统后,可均匀地照射整个像增强器的阴极面.通过 CCD 采集得到阴极上 54 个时刻的像如图 10.

采用溅射和蒸镀的方式在基底面向阴极的一面均匀镀上一层 10 ns 厚的金属铝薄膜,再加镀一层保护膜以防止金属氧化,在此基底上按正常工艺制作阴极^[18],采用光纤耦合的方式将该阴极耦合在 ICCD 上,采用如图 9 所示的测试原理在相同实验条件下,拍摄得到如图 11 的 ICCD 开启关闭过程.

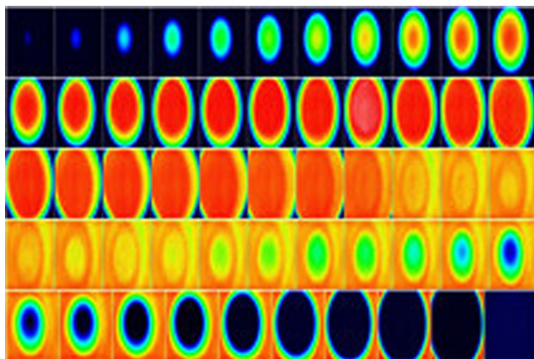


图 10 未加导电基底时 ICCD 打开到关闭的全过程伪彩色图片(拍摄间隔为 5 ns)

Fig.10 Pseudo-color pictures of the entire process of opening and closing the ICCD without conductive substrate added(5 ns interval for each photo)

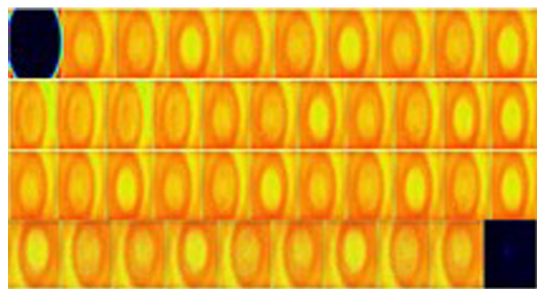


图 11 增加金属导电基底后 ICCD 打开与关闭过程伪彩色图片(拍摄间隔为 5 ns)

Fig.11 Pseudo-color pictures of the entire process of opening and closing the ICCD with conductive substrate added (5ns interval for each photo)

从图 10 和图 11 可知,当光阴极未加导电金属导电基底时,ICCD 从关闭到完全打开需要约 85 ns,而从开启状态到完全关闭则需要更长时间,约为 160 ns,整个过程达到 245 ns;当增加金属导电基底后,开启和关闭的过程全都缩短到了一个步长的时间内(5 ns).实验进一步验证了金属导电基底对阴极选通时间的重要影响,同时也证明了如图 7 所示模型的正确性.负脉冲加载在阴极上,在阴极上会形成电场,补充电子会在电场的作用下加速移动,波的传播速度是电场的建立速度,而该建立时间由材料的介电常数和电导率决定,减

小阴极表面的面电阻或者提高基底的导电率,可以提高场强的建立速度,补充电子的速度正比于该建立速度,因此提高导电基底的电导率或者提高介质的介电常数(电容性)是提高像增强器开门时间的有效途径;由于像增强器是真空器件,介电常数很难改变,只能通过镀金属导电基底的方式提高开门时间.后续将进一步开展不同导电率对开门时间的量化研究,为优化设计提供更加详细的理论参考.

3 结论

本文采用数字逻辑电路与模拟延迟电路相结合的方式,设计实现了多通道脉宽调节精度为 5 ns、最小脉宽为 45 ns、重复频率可达 1 MHz 的分幅相机 ICCD 选通脉冲源.基于该脉冲源,测试了光阴极镀有金属导电基底时对 ICCD 实际选通时间的影响,结果表明增加阴极导电基底可以大幅提高光阴极开门速度,缩短 ICCD 实际选通时间.建立相应的等效电路模型分析后得出光阴极的开门时间随着其面电阻的增大而增加,对于 ICCD 的实际应用具有参考意义.

参考文献

- [1] SONG Shu-yan, CHEN Bo. The principles and applications of ICCD[J]. *Science & Technology Information*, 2007 **29**: 436-437.
宋述艳, 陈波. 新型图像传感器 ICCD 的原理及应用[J]. *机械与电子*, 2007 **29**: 436-437.
- [2] XU H H, SUN S Z, LIU F S, *et al.* An experimental and computational study of OH formation in laminar coflow syngas diffusion flames[J]. *FUEL*, 2018 **225**: 47-53
- [3] BELOPLOTOV D V, LOMAIEV M I, SOROKIN D A, *et al.* Ionization waves during the subnanosecond breakdown initiated by runaway electrons in high-pressure nitrogen and air[J]. *Russian Physics Journal*, 2017 **60**(8): 1308-1303.
- [4] LIU Ji-kun, ZHAO Bao-yun. Intensified CCD image sensors[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1998, **19**(1): 37-39.
刘继琨, 赵宝芸. 增强型 CCD 图像传感器[J]. *半导体光电*, 1998, **19**(1): 37-39.
- [5] 朱寅非. 超高速分幅相机中高精度脉冲延时发生器的研究和设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 7-10.
- [6] 唐斌. 超高速数字分幅相机快门控制电路研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 6-7.
- [7] WANG Meng-yu, ZHANG Yan-chao, LI Mei-lun, *et al.* Research on high-precision pulsed delay and pulse width control based on laserlidar[J]. *Science & Technology Information*, 2016, **34**(8): 3-6.
王梦宇, 张延超, 李美伦, 等. 用于激光雷达的高精度脉冲延时及脉宽控制研究[J]. *机械与电子*, 2016, **34**(8): 3-6.
- [8] HE Huan, TIAN Jin-shou, WEN Wen-long, *et al.* The design and implementation for a range-gated ICCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(6): 0611001.
何欢, 田进寿, 温文龙, 等. 一种用于距离选通的 ICCD 设计与实现[J]. *光子学报*, 2015, **44**(6): 0611001.
- [9] WU Li-na, WEN Wen-long, XU Xiang-yan. The design of FPGA circuit for controlling ICCD[J]. *Microprocessors*, 2012, **33**(1): 17-19.
吴丽娜, 温文龙, 徐向晏. 利用 FPGA 实现 ICCD 控制电路设计[J]. *微处理机*, 2012, **33**(1): 17-19.
- [10] HE Yun, XU Wen-yuan. A method of generating high precision large dynamic range distance simulation pulse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(11): 3408-3412.
何韵, 许文渊. 一种高精度大动态范围的距离模拟脉冲发生方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(11): 3408-3412.
- [11] LIU Peng, XU Ke. A design of digital delay line based on FPGA[J]. *Microcomputer Information*, 2010, **26**(8): 132-134.
刘鹏, 许可. 一种基于 FPGA 的高精度大动态数字延迟单元的设计[J]. *微计算机信息*, 2010, **26**(8): 132-134.
- [12] HE Zhao, ZHOU Yan, FAN Song-tao, *et al.* Range-gated synchronization control circuit design based on FPGA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S3): 178-181.
何钊, 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**(S3): 178-181.
- [13] WANG Ke-jia, ZHOU Bao-yu. Design of changeable delay chip with CPLD[J]. *Applied Science and Technology*, 2001, **28**(4): 12-13.
王克家, 周宝宇. 用 CPLD 实现可变延时芯片的设计[J]. *应用科技*, 2001, **28**(4): 12-13.
- [14] PAN Fang. Application of RS232 serial port in communication between PC and MCU [J]. *Modern Electronic Technology*, 2012, **35**(13): 69-71.
潘方. RS 232 串口通信在 PC 机与单片机通信中的应用[J]. *现代电子技术*, 2012, **35**(13): 69-71.
- [15] LIU Kang, WANG Xuan-yin. Design and implementation of TCP/IP in an embedded microcontroller system of data communication[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2003, **40**(6): 43-45.
刘康, 王宣银. 嵌入了 TCP/IP 协议的单片机数据通信系统的设计与实现[J]. *电测与仪表*, 2003, **40**(6): 43-45.
- [16] 王佳荣. 基于 DDS 技术的信号发生器设计[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
- [17] 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 1 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 159-161.
- [18] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 70-107.

- [19] ZHAO Fei-fei, ZHAO Bao-sheng, WEI Yong-lin, *et al.* Growth and properties of conductive substrates ultraviolet photocathode with high resistance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1211-1216.
赵菲菲,赵宝升,韦永林,等.高阻紫外光阴极导电基底制备及性能[J].光学学报,2010,**30**(4):1211-1216.
- [20] 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底[J].光子学报,2000,**29**(9):861-864.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No.41530422), the Innovation Foundation of the Chinese Academy of Sciences (No.CXJJ-16S015)

引用格式: HU Jun-yu, PEI Cheng-quan, TIAN Jin-shou, *et al.* Design and Experimental Study of ICCD Gated Pulse Source[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0911001
虎俊宇,裴承全,田进寿,等.ICCD选通脉冲源的设计与实验研究[J].光子学报,2018,**47**(9):0911001