

文章编号: 1672-8785(2021)01-0027-06

## 近红外单光子探测器窄门控信号产生方法研究

王建国<sup>1</sup> 刘 雷<sup>2</sup> 李韶光<sup>1</sup> 郎金鹏<sup>1</sup> 毕宗义<sup>1</sup> 吕振川<sup>1</sup>

(1. 中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555;

2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

**摘 要:** 采用门控淬灭技术的单光子探测更容易实现高速探测, 并且使用寿命更长。门控信号的宽度与探测噪声及探测效率直接相关。基于高速 D 触发器特性以及高精度可编程延迟芯片, 提出了一种频率和门控信号宽度可调的脉冲信号产生方法。通过对芯片特性进行研究, 设计了实验电路并对实验结果进行了展示和讨论。结果表明, 该方法能够产生最小门宽 1 ns、最大频率 100 MHz 的门控信号。

**关键词:** 门控淬灭; 单光子探测器; 门控信号产生; 可控窄脉冲

**中图分类号:** TN215.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.01.006

## Research on Narrow Gated Signal Generation Method of Near-Infrared Single Photon Detector

WANG Jian-guo<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>2</sup>, LI Shao-guang<sup>1</sup>, LANG Jin-peng<sup>1</sup>,

BI Zong-yi<sup>1</sup>, LV Zhen-chuan<sup>1</sup>

(1. China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao 266555, China;

2. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Single-photon detection using gated quenching technology is easier to achieve high-speed detection and has a longer service life. The width of the gated signal is directly related to the detection noise and detection efficiency. Based on the characteristics of high-speed D flip-flop and high-precision programmable delay chip, a pulse signal generation method with adjustable frequency and gated signal width is proposed. The experimental circuit is designed by studying the characteristics of the chip, and the experimental results are displayed and discussed. The results show that the method can generate a gated signal with a minimum gate width of 1 ns and a maximum frequency of 100 MHz.

**Key words:** gated quenching; single photon detector; gated signal generation; controllable narrow pulse

**收稿日期:** 2020-09-15

**作者简介:** 王建国(1992-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士, 主要从事光纤传感和光链路测试仪器的整体方案及硬件方面的研究。E-mail: wjg\_1012@126.com

## 0 引言

单光子探测器可以用于对极限微弱光信号的测量,并能够对单个光子信号进行探测。目前,它被广泛应用于量子通信、光谱测量、激光测距和生物医学等领域<sup>[1-4]</sup>。由于单光子经过光电探测器后所产生的光电流强度比光电探测器在室温下的热噪声水平( $10^{-14}$  W)还要低,因此探测器需要采用特殊的材料和技术。

能够响应单光子量级的光电子器件主要有光电倍增管和雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)。其中,光电倍增管主要工作在紫外和可见光波段,具有探测效率高和增益大的优点。但是体积庞大、所需工作电压高以及使用复杂等缺点限制了其在某些方面的应用。APD有Si、Ge和InGaAs/InP三种类型。其中, Si-APD主要工作在400~1100 nm波段,并可在该波段实现85%的量子效率; Ge-APD可以应用于光纤传输损耗较小的1310 nm通信窗口,但是需要工作在极低的温度条件下;而在1550 nm通信窗口, InGaAs/InP-APD的量子效率可达到20%。

在进行单光子探测时, APD通常工作在盖革模式。在该模式下,为获得更大的雪崩电流, APD的工作电压要高于雪崩电压。为了避免由噪声产生的自持雪崩电流对单光子信号检测产生影响,需要用另外的淬灭电路使APD的偏置电压降到雪崩电压以下。常用的淬灭电路主要有被动淬灭、主动淬灭和门控淬灭三种<sup>[5-6]</sup>。其中,被动淬灭方式使用的大电阻值会导致两次探测光子的时间间隔增加,限制了该方式在高速单光子探测中的应用<sup>[7]</sup>。在主动淬灭方式中,由于APD两端的工作电压始终高于雪崩电压, APD的使用寿命极大缩短<sup>[8]</sup>。门控淬灭方式是目前大部分单光子APD探测器所采用的方法,其基本原理如下:光子到达时,在APD两端施加门控信号,使偏置电压高于雪崩电压;完成一次探测后,偏置电压降到雪崩电压以下<sup>[9]</sup>。门控信号的门宽决定了一次单光子信号检测的持续时间。窄的

门宽可以有效降低暗计数并提高探测器的探测频率。本文提出了一种门宽和频率可调的门控信号产生方法,并利用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)芯片和可编程延迟芯片产生了频率可控的1 ns、2 ns和3 ns门控脉冲。

## 1 门控信号产生原理及设计

为了使施加门控信号后的单光子APD两端电压大于雪崩电压,通常要先在其两端加载偏压。一种可行的门控信号产生方法是直接利用FPGA芯片产生输出信号<sup>[10-11]</sup>,然后将其经放大电路后直接驱动单光子APD。虽然这种方法较为直接,但是在产生窄脉冲(如3 ns和5 ns)时需要很高的时钟频率。这会增加时序分析的难度并且很难产生1 ns门控信号。图1为本文讨论的门控信号产生方法的原理图。采用两个精密延迟芯片分别产生D触发器的时钟信号和复位信号,并利用高速D触发器的特性以及时钟信号与复位信号的时间差来产生门控信号。D触发器是一种有记忆功能并有两个稳定状态的信息存储器件,是构成多种时序电路最基本的逻辑单元,也是数字逻辑电路中一种重要的单元电路。D触发器的次态取决于触发前D端的状态,即次态=D。因此,它具有置“0”和置“1”两种功能。在D触发器复位输入端口无效的情况下,Q端在时钟上升沿到来时的输出等于上一时刻D端口的值。如果复位端口的输入信号有效,那么Q端口的输出信号为零。

以高速D触发器芯片MC10EP31为例,表1是其数据手册中的输出真值表。可以看出,该芯片在时钟上升沿触发输出。如图2所示,在时钟上升沿到来后并在复位端信号为低电平的 $t_1$ 时刻,Q输出端信号等于D端的输入信号,即变为高电平。在RST信号变为高电平有效后,Q端输出信号马上被复位而输出低电平。在RST信号重新变为低电平后,时钟信号和复位信号都为低电平。根据表1可知,Q输出端信号等于上一时刻的Q端输出

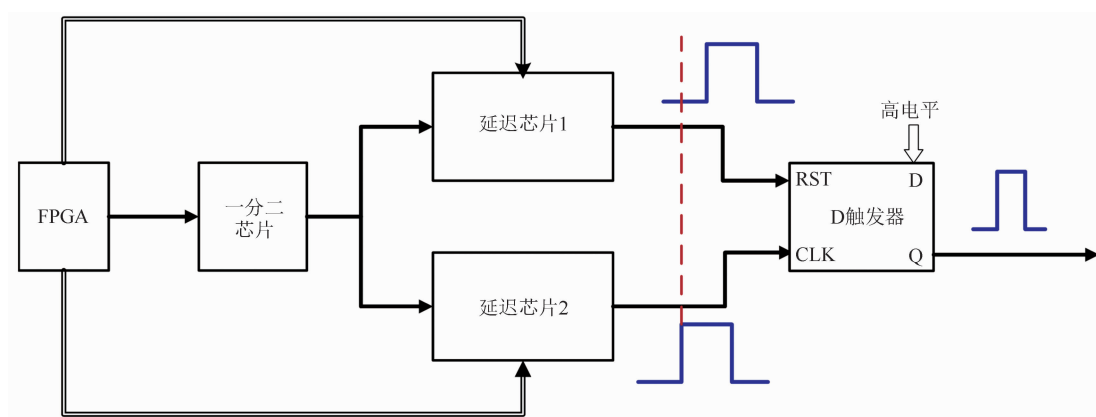


图 1 可控门控信号产生方法的原理图

表 1 MC10EP31 芯片的真值表

D	SET	RESET	CLK	Q
L	L	L	Z	L
H	L	L	Z	H
X	H	L	X	H
X	L	H	X	L
X	H	H	X	UNDEF

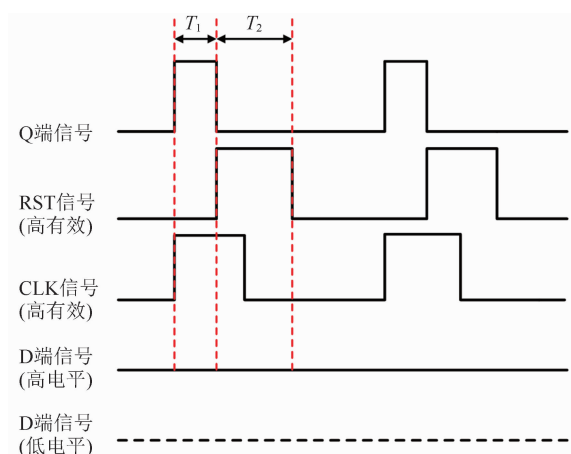


图 2 窄脉冲产生方法的时序示意图

值(为低电平)。这样就产生了一个脉冲门控信号。

在产生窄脉冲时,对 D 触发器的性能有一定的要求。本文所用的 MC10EP31 芯片是一种由 ON Semiconductor 公司生产的具有快速 AC 性能的 D 触发器。它具有温度补偿功能,能够有效减小外界温度波动对芯片特性的影响。该芯片的典型传输延迟为 340 ps,最大可稳定工作的频率为 3 GHz,同时具有 SET 和 RESET 输入端口。由于在使用时没有用到

SET 端口,所以将其与地连接。它的输入端采用 ECL 电平。ECL 电平是发射极耦合逻辑,其主体结构 with TTL 电平一样,由三极管构成。不同的是,ECL 内部的三极管工作于非饱和状态,符合高速信号逻辑状态迅速变化的要求,非常适合高速应用。

在上述门控信号产生方法中,门控信号的频率可通过 FPGA 产生的初始矩形波信号来加以调节。由于初始矩形波信号的宽度与产生门控信号的宽度无关,因此可以有效降低 FPGA 的时钟频率并增加产生信号的准确性。本文所用 FPGA 产生的初始矩形波信号的宽度为 10 ns。通过精密可调延迟芯片 1 和 2 分别控制 RST 和 CLK 信号的到达时间,从而精确调节门控信号宽度。延迟芯片的特性直接决定产生的窄脉冲信号的精度。

本文所用的延迟芯片为 ON Semiconductor 公司生产的 MC10EP195 精密可编程延迟芯片。它主要由 FPGA 和多路复用器构成。通过编程控制延迟增量。最小延迟量为 10 ps,最大延迟量为 10.2 ns。在芯片管脚 LEN 为低电平的

情况下,具体延迟量主要由 10 个数据输入端口 D[9:0] 的值来决定。当芯片管脚 LEN 为高电平状态时,芯片会锁定并保持当前的延迟数值。数据端口可与 FPGA 管脚连接,便于控制。为了减小 FPGA 输出信号的抖动,在电路中的两个芯片输出管脚之间增加 74LCX16245 双向缓冲器。在本文方法中,采用一个 FPGA 主控芯片可以精确调节两个延迟芯片的延迟量。虽然每个延迟芯片对信号的固有延迟量略有差别,但是经过实际测量后可将这部分延迟调节平衡,进而得到精确的窄门控信号。

## 2 实验数据及结果分析

根据上述门控脉冲产生方法设计了电路实物。图 3 和图 4 所示分别为 1 ns 和 2 ns 门控脉冲信号。图中的脉冲信号并不是规则的矩形脉冲,这主要是由电路中器件的寄生电容引起的。脉冲宽度的精度误差主要是由延迟芯片的延迟量精度和两路信号的线路延迟差别造成的。通过调节 FPGA 初始信号的频率,产生的 2 MHz 和 100 MHz 门控信号分别如图 5 和图 6 所示。

## 3 结论

本文讨论了一种可行的近红外单光子探测器门控信号产生方法。通过介绍 D 触发器的特性,在理论上证明了该方案的可行性。在深入

研究高速 D 触发器和高精度可编程延迟芯片的基础上,设计了门控信号产生电路。在设计电路板并使用 FPGA 芯片进行编程控制后,测得的输出信号显示,该方法所产生的门控信号的脉宽和频率都可调节。最小门控宽度为 1 ns,最大门控信号频率为 100 MHz。通过优化 FPGA 程序和使用高性能器件,门控信号的宽度和频率有望进一步提高。这对采用单光子探测器进行高速和高效探测研究具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 董常军,王朝林. 一种基于 FPGA 的红外探测器模拟器的设计 [J]. *激光与红外*, 2014, **44**(2): 204-206.
- [2] Buttafava M, Boso G, Ruggeri A, et al. Time-gated single-photon detection module with 110 ps transition time and up to 80 MHz repetition rate [J]. *Review of scientific instruments*, 2014, **85**(8): 083114.
- [3] Bouzid A, Nahhas A M, Guedri K. InGaAs/InP avalanche photodiode for infrared single photon detection using a time-to-voltage converter [J]. *Optics Communications*, 2014, **328**: 37-40.
- [4] 宣飞,辛欢,曹昌东,等. 水下微脉冲激光雷达单光子测距技术研究 [J]. *激光与红外*, 2011, **41**(9): 983-985.

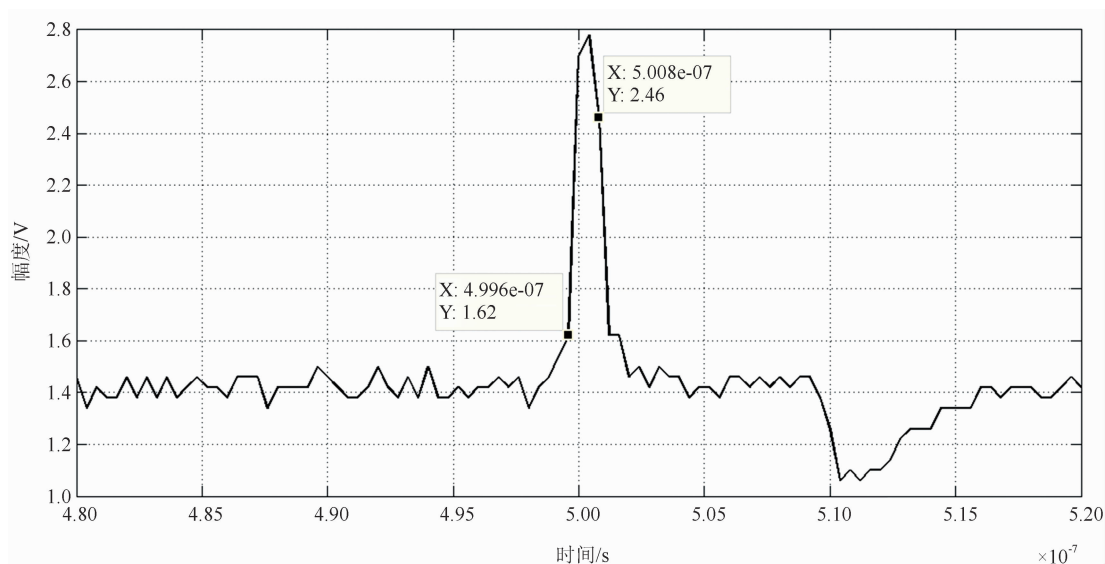


图 3 1 ns 门控信号

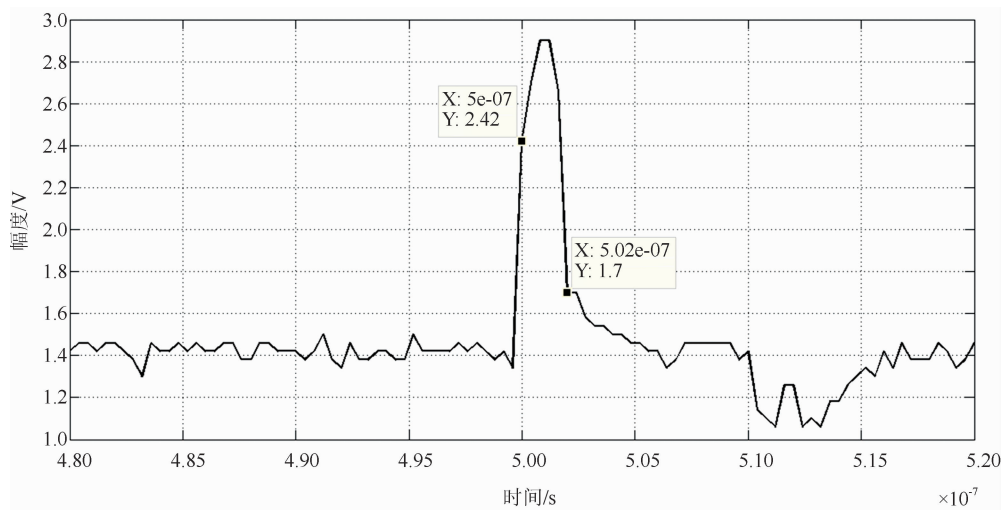


图 4 2 ns 门控信号

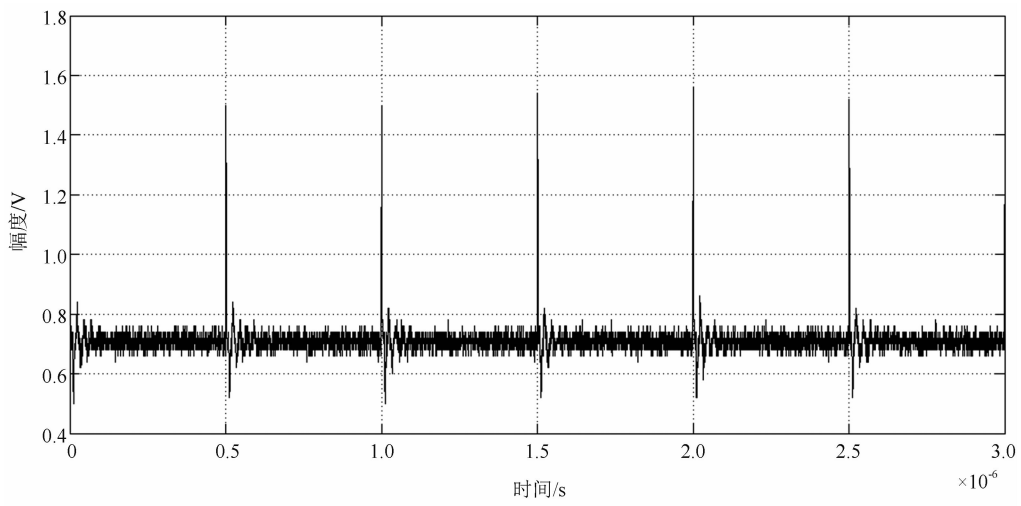


图 5 2 MHz 门控信号

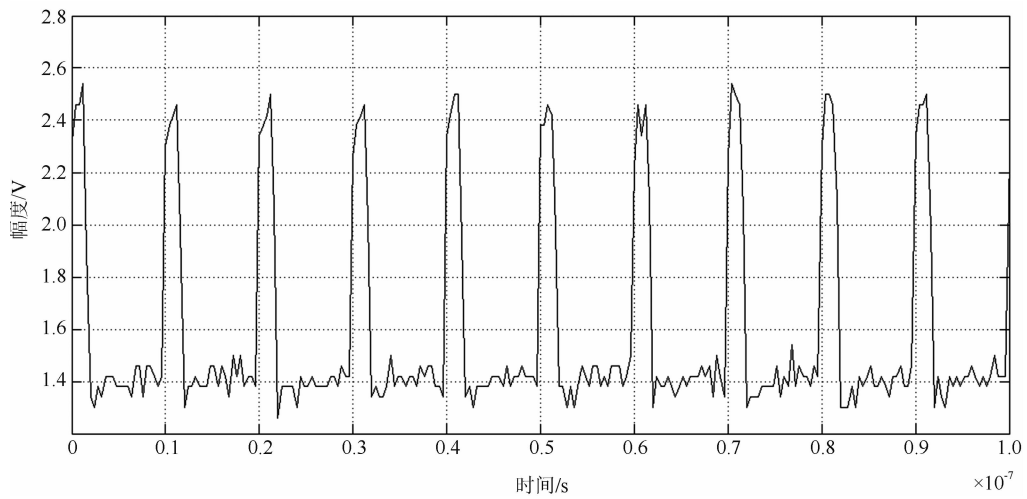


图 6 100 MHz 门控信号

- [5] Cova S, Ghioni M, Lacaïta A, et al. Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection [J]. *Applied optics*, 1996, **35** (12): 1956–1976.
- [6] Liang Y, Jian Y, Chen X, et al. Room-temperature single-photon detector based on InGaAs/InP avalanche photodiode with multichannel counting ability [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **23**(2): 115–117.
- [7] 张鹏飞, 周金运. 单光子探测器及其发展 [J]. *传感器世界*, 2003, **9**(10): 6–10.
- [8] 李璐. 基于雪崩二极管的通讯波段单光子探测器技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] 张鹏飞, 周金运, 廖常俊, 等. APD 单光子探测技术 [J]. *光电子技术与信息*, 2003, **10**(6): 6–11.
- [10] 高家利, 汪科, 盘红霞. 近红外 1550 nm 单光子探测器硬件电路设计 [J]. *激光与红外*, 2015, **45**(6): 674–677.
- [11] Do Amaral G C. FPGA applications on single photon detection systems [D]. Ponce: Pontifical Catholic University, 2014.

(上接第 5 页)

- [8] 张昊春, 曲博岩, 金亮. 考虑太阳辐射影响的飞机实时探测红外成像仿真 [J]. *应用光学*, 2019, **40** (6): 929–936.
- [9] Xiao Y H, Zhen H. Pedestrian Crowd Detection Based Unmanned Aerial Vehicle Infrared Imagery [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2017, **873**: 347–352.
- [10] Achouche M, Glastre G, Caillaud C, et al. InGaAs Communication Photodiodes: from Low-to High-power-level Designs [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, **2** (3): 460–468.
- [11] Bauer J G, Albrecht H, Hoffmann L, et al. Locally Ion-implanted JFET in an InGaAs/InP p-i-n Photodiode Layer Structure for a Monolithically Planar Integrated Receiver OEIC [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 1992, **4** (3): 253–255.
- [12] Zang J Z, Morgan J S, Xie X J, et al. InP/InGaAs Photovaractor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36** (9): 1661–1665.
- [13] ATLAS User's Manual [M]. Santa Clara: Silvaco International, 2015.
- [14] Wang Y D, Chen J, Xu J T, et al. Modeling of Frequency-dependent Negative Differential Capacitance in InGaAs/InP Photodiode [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2018, **89**: 41–45.