



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105652259 A

(43) 申请公布日 2016. 06. 08

(21) 申请号 201511031793. 4

(22) 申请日 2015. 12. 30

(71) 申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路 92 号

(72) 发明人 赵毅强 赵佳姮

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

代理人 李丽萍

(51) Int. Cl.

G01S 7/48(2006. 01)

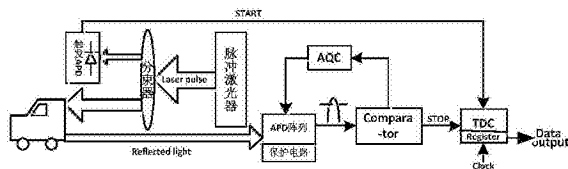
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

基于盖革模式 APD 阵列的激光测距读出时序电路及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于盖革模式 APD 阵列的激光测距读出时序方法, 将分束器置于脉冲激光器与被测物之间, 将 APD 阵列置于被测物的正后方; 由脉冲激光器发射激光脉冲, 通过分束器一路主动投向被测物另一路投向触发 APD, 触发 APD 响应后向 TDC 电路发出 START 信号使其开始计数工作并以二进制码来表示, 并存入 APD 阵列的行级寄存器中, 接收到由被测物反射回来的光子后发生雪崩击穿, 在皮秒级时间内产生毫安级的雪崩电流, 转换成的电压信号超过比较器阈值时, 则产生一个停止信号使 TDC 电路停止计数, 经 TDC 电路输出二进制码。本发明采用行级 TDC 架构实现, 能够有效减小像元尺寸, 为减小读出电路面积、降低读出电路功耗提供了一种新颖可行的方案。



1. 一种基于盖革模式APD阵列的激光测距读出时序电路,其中,激光测距系统包括脉冲激光器、APD阵列、分束器和触发APD,其特征在于:

与所述APD阵列连接有一读出时序电路,所述读出时序电路包括AQC电路、比较器和TDC电路;所述AQC电路包括淬灭电阻 R_s 、复位开关和Hold-off电路,其中,所述淬灭电阻 R_s 的一端与所述APD阵列的阳极相连,所述淬灭电阻 R_s 的另一端接地;所述淬灭电阻 R_s 与所述复位开关并联,所述复位开关连接至所述Hold-off电路的一端,所述Hold-off电路的另一端与所述比较器的输出端相连;所述AQC电路的一端与APD阵列相连,所述AQC电路的另一端与所述比较器的输入端相连,所述比较器的输出端与TDC电路相连。

2. 一种基于盖革模式APD阵列的激光测距读出时序方法,其特征在于:步骤如下:

将分束器置于脉冲激光器与被测物之间,将APD阵列置于被测物的正后方;由脉冲激光器发射激光脉冲,通过放置于脉冲激光器的正前方、被测物的后方的分束器分为两路,其中一路主动投向被测物,同时另一路投向触发APD,并由该触发APD响应后向TDC电路发出START信号使TDC电路开始计数工作并以二进制码来表示,按照行地址的顺序将该二进制码存入APD阵列的行级寄存器中;当APD阵列接收到由被测物反射回来的光子后发生雪崩击穿,从而在皮秒级时间内在APD阵列内部产生毫安级的雪崩电流,而后雪崩电流经所述读出时序电路转换成电压信号,当该电压信号超过比较器阈值时,则所述比较器产生一个停止信号使TDC电路停止计数,最后经所述TDC电路输出二进制码。

基于盖革模式APD阵列的激光测距读出时序电路及方法

技术领域

[0001] 本发明属于激光探测读出电路领域,特别涉及一种应用于盖革模式APD阵列的读出时序方法。

背景技术

[0002] 一直以来,激光测距技术是发展激光跟踪、激光雷达、测速、扫描成像、多普勒成像等技术的重要基础,在军事和民用领域都有着举足轻重的地位。随着光电技术的不断发展,有关激光测距的各项关键技术都在不断地成熟和完善。高功率短脉冲激光源、皮秒级的电子线路和光子级别的光电探测器,使得激光测距在测程和精度上都得到了显著的提高。在民用测距、工业控制和军事遥感等领域中,目前的测量精度可以达到毫米级,而测程可达数百公里。

[0003] 在种类繁多的光电探测器中,工作在非线性模式(又称为盖革模式,Geiger mode, Gm)的雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)具备响应单个光子的能力,成为激光测距中极具发展前景的光电探测器。APD是基于内光电效应且具有内部高增益的光电检测器件,通过光生载流子在高电场作用下形成雪崩效应,从而获得宏观的光电流。这种光电流的产生机理使得APD具有极高的探测灵敏度,为实现对微弱发光目标或远距离目标的探测提供了可能。而对目标的精确测距是3-D成像的基础,因为要实现目标的三维探测,除了需要目标的方位角和俯仰角之外,还要获得目标的距离信息(称之为角度-角度-距离像, Angle-Angle-Range, AAR)。

[0004] 国际上,以美、法为代表的欧美国家长久以来都在致力于APD阵列3-D成像技术的研究,目前已经取得了比较瞩目的成果,实现了大阵列的产品化,但对我国尚有技术封锁。而国内方面从事APD阵列研究的研究单位及高校很少,在读出电路及时序设计上没有突破和创新。盖革模式APD阵列的读出电路(ROIC)按照TDC(Time to Digital Converter, 时间数字转换电路)的架构分为三类:像素级TDC读出电路、行级TDC读出电路和系统级TDC读出电路。其中像素级TDC读出电路架构是目前国内研究的主流,这种结构为每一个像素均配备一个TDC模块,时序上很简单,但只适用于小阵列规模,且像元尺寸很大、功耗很高;系统级TDC读出电路架构是整个阵列共享一个TDC模块,像元尺寸不再受限,但只适用于极小的阵列规模,否则无法处理大量的信号;而行级TDC架构是以阵列的行为单位,每行配备一个TDC模块,这是目前解决大阵列规模和像元尺寸之间折中的唯一有效途径。但是由于行级TDC结构涉及到很复杂的读出时序,因此国内没有相关方面的详细研究。

发明内容

[0005] 针对现有技术,本发明提出了一种基于盖革模式APD阵列的激光测距读出时序方法,是一种专用于工作在盖革模式下 32×32 规模的APD阵列的新型读出时序方法,其采用行级TDC架构实现,能够有效减小像元尺寸,为减小读出电路面积、降低读出电路功耗提供了一种新颖可行的方案。

[0006] 为了解决上述技术问题,本发明提出的一种基于盖革模式APD阵列的激光测距读出时序电路,其中,激光测距系统包括脉冲激光器、APD阵列、分束器和触发APD,与所述APD阵列连接有一读出时序电路,所述读出时序电路包括AQC电路、比较器和TDC电路;所述AQC电路包括淬灭电阻 R_s 、复位开关和Hold-off电路,其中,所述淬灭电阻 R_s 的一端与所述APD阵列的阳极相连,所述淬灭电阻 R_s 的另一端接地;所述淬灭电阻 R_s 与所述复位开关并联,所述复位开关连接至所述Hold-off电路的一端,所述Hold-off电路的另一端与所述比较器的输出端相连;所述AQC电路的一端与APD阵列相连,所述AQC电路的另一端与所述比较器的输入端相连,所述比较器的输出端与TDC电路相连。

[0007] 同时本发明中的一种基于盖革模式APD阵列的激光测距读出时序方法,步骤是:将分束器置于脉冲激光器与被测物之间,将APD阵列置于被测物的正后方;由脉冲激光器发射激光脉冲,通过放置于脉冲激光器的正前方、被测物的后方的分束器分为两路,其中一路主动投向被测物,同时另一路投向触发APD,并由该触发APD响应后向TDC电路发出START信号使TDC电路开始计数工作并以二进制码来表示,按照行地址的顺序将该二进制码存入APD阵列的行级寄存器中;当APD阵列接收到由被测物反射回来的光子后发生雪崩击穿,从而在皮秒级时间内在APD阵列内部产生毫安级的雪崩电流,而后雪崩电流经所述读出时序电路转换成电压信号,当该电压信号超过比较器阈值时,则所述比较器产生一个停止信号使TDC电路停止计数,最后经所述TDC电路输出二进制码。

[0008] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0009] 本发明中读出时序方法结合其对应的读出时序电路,主要是针对 32×32 规模的Gm-APD阵列,使用本发明可实现测量范围在3000m内的激光脉冲测距,是实现3-D成像的重要基础。在读出时序电路上实现了行级TDC架构,非常有效地减小了像元尺寸,为实现大阵列规模的激光探测提供了有效可行的读出方案,并且有效地降低了读出电路的功耗。

附图说明

[0010] 图1是本发明所涉及的激光测距系统示意图;

[0011] 图2是光子飞行时间时序图;

[0012] 图3是本发明中APD阵列及读出时序电路关系示意图;

[0013] 图4是本发明中TDC电路中微小时间差示意图;

[0014] 图5是一种延时线型TDC电路结构示意图;

[0015] 图6是图5所示TDC电路延时原理图;

[0016] 图7是本发明激光测距系统的读出时序图;

[0017] 图8是本发明中APD像素读出时序电路示意图。

具体实施方式

[0018] 下面结合附图和具体实施例对本发明技术方案作进一步详细描述,所描述的具体实施例仅对本发明进行解释说明,并不用以限制本发明。

[0019] 针对于最大量程为3000m的非合作目标主动探测,本发明采用激光一次成像的方式,APD阵列激光测距是基于光子飞行时间(Time of Light, TOF)的计数原理,该激光测距系统示意图如图1所示。

[0020] 本发明提出的一种基于盖革模式APD阵列的激光测距读出时序电路,其中,激光测距系统包括脉冲激光器、APD阵列、分束器和触发APD,与所述APD阵列连接有一读出时序电路,如图8所示,所述读出时序电路包括AQC电路、比较器和TDC电路;所述AQC电路包括淬灭电阻 R_s 、复位开关和Hold-off电路,其中,所述淬灭电阻 R_s 的一端与所述APD阵列的阳极相连,所述淬灭电阻 R_s 的另一端接地;所述淬灭电阻 R_s 与所述复位开关并联,所述复位开关连接至所述Hold-off电路的一端,所述Hold-off电路的另一端与所述比较器的输出端相连;所述AQC电路的一端与APD阵列相连,所述AQC电路的另一端与所述比较器的输入端相连,所述比较器的输出端与TDC电路相连。

[0021] 本发明中基于盖革模式APD阵列的激光测距读出时序方法是,如图1所示,将分束器置于脉冲激光器与被测物(示意图中为车)之间,将APD阵列置于被测物的正后方。激光测距系统工作时,由脉冲激光器发射激光脉冲,通过放置于脉冲激光器的正前方、被测物的后方的分束器分为两路,大部分通过分束器主动投向被测物,同时小部分投向触发APD,并由该触发APD响应后向TDC电路发出START信号使TDC电路开始计数工作并以二进制码来表示,按照行地址的顺序将该二进制码存入APD阵列的行级寄存器(Register)中;当APD阵列接收到由被测物反射回来的光子后有一定概率会发生雪崩击穿,从而在皮秒级时间内在APD阵列内部产生毫安级的雪崩电流,而后雪崩电流经所述读出时序电路转换成电压信号,当该电压信号超过比较器(Comparator)阈值时,则所述比较器的电压信号会产生一个停止信号(STOP信号)使TDC电路停止计数,经所述TDC电路输出二进制码(Data output),经后端处理即可得出被测物与APD阵列之间的准确距离,由于TDC电路所记的数值乘以对应的时钟(Clock)周期,就是光子飞行时间的二倍,也就是从START信号上升沿到STOP信号上升沿之间的对应时间,如图2所示。

[0022] 如图3所示,为了提高测距精度,本发明中将TDC电路分为粗计数器(coarse counter)和细计数器(fine counter)两个部分。其中粗计数部分对应于一个常见结构的计数器,为像素级结构,即每个像素采用单独的计数器进行计数,互不干扰。图3中的左边显示出本发明中APD阵列为 32×32 的Gm-APD阵列,其中的每个单元都是一个相同的雪崩光电二极管,图3中的右边为其中一个单元的放大图。在每个像素内部,APD的阴极被偏置在 $V_{break+ex}$ 的电压下,其中 V_{break} 是使APD发生雪崩的最小击穿电压, V_{ex} 是保证APD雪崩的附加电压;APD的阳极通过淬灭电阻 R_s 接地。发生雪崩后,APD产生的雪崩信号会控制AQC电路降低APD阳极的偏置电压来使其雪崩猝灭,同时控制TDC电路的粗细计数器同时停止计数。由于细计数器是行级共享,因此要将每个像素产生的STOP信号对应的细计数器数值存入行级寄存器(Register)的对应地址。

[0023] 而为了实现高精度测距乃至对被测物的三维探测以获得3-D图像,必须考虑到,STOP信号的到来并不总是与计数器的时钟沿对齐,如图4所示,当STOP信号的上升沿落在Clock一个周期 T 内的任意非上升沿处时,计数器都会默认记下一个完整周期的时间。这样就比实际时间多算了 $T - \Delta$,这意味着单纯的像素级计数器并不能够精确地测出光子飞行时间,而一味地提高时钟频率并非切实可行。因此,本发明中的TDC电路采用细计数的方式将这部分微小时间差 Δ 准确表示出来,需要由行级细计数器来实现。如图5所示,细计数器是行级共享结构,基于内插技术的理念,将主时钟的一个周期细分成10份,采用延时线型TDC(Time-to-Digital Converter,即时间数字转换器,是常用的时间间隔测量电路)结构。每个

延时单元是由缓冲器(BUF)组成的,10个BUF完全相同。系统主时钟信号c1k由左边第一个延时单元输入,按照从左往右的顺序依次通过这10个延时单元组成的延时链。START信号作为D触发器链的CK输入端。D触发器的功能是将c1k信号与START信号作比较,当START信号的上升沿到来时,D触发器链中的每个D触发器都将被延时单元(BUF)延时了 τ 后的主时钟上升沿与其作比较,并在 Q_n 端输出对应的码值(0或1)。每个 Q_n 端与对应的多路选择器的“0”端相连,并由使能信号EN控制输出。多路选择器的输出端与最下一排的D触发器链的D端对应相连。最后在时钟信号c1k的控制下,按照从右往左的顺序串行输出一个10bit的二进制码,即为时间差 Δ 。延时原理图如图6所示,在主时钟的一个周期内,当主时钟的上升沿通过第一个延时单元时,被延时了时间 τ ,STOP信号的上升沿与其相比(图6中第二条虚线),处于高电平,因此输出“1”。当通过第二个延时单元时,STOP信号的上升沿再与主时钟上升沿相比,处于高电平,因此依然输出“1”。依此类推,当主时钟上升沿通过了第七个延时单元以后,STOP信号的上升沿与其相比,首次处于低电平,因此第一次输出“0”。依此类推,直到通过了最后一个延时单元,STOP信号的上升沿依然处在低电平处,因此最后一位输出“0”。这个10bit码值,与粗计数器的数值结合后,经简单的转换即可得出光子飞行的准确时间。

[0024] 实施例:使用本发明实现激光测距。

[0025] 首先,测距的最大量程为3000m,因此对应的时间最大量程 T_{\max} 为20us(见式1)。系统要实现3cm的距离分辨率,因此对应的时间分辨率 t_r 为200ps(见式2)。由于系统主时钟为100MHz,且时间最大量程为20us,因此计数器需要最大计数2000次(见式3),且因为 $2^{11}=2048>2000$,所以粗计数器为11位。细计数器时钟频率为1GHz,对应的时间周期是1ns,即细计数器的延时链是将1ns的时间细分。每个延时单元是由两个反相器(inv)组成的缓冲器(BUF),采用SMIC 1.8V工艺对延时单元后仿后得到的延时是80ps左右,由公式4得出需要12.5个延时单元,再考虑到走线延时,将延时单元数 n 定为10个,因此细计数器最终输出的码值为10bit。

$$[0026] \quad T_{\max} = \frac{S}{c} = \frac{3000m \times 2}{3 \times 10^8 m/s} = 20us \quad (1)$$

$$[0027] \quad t_r = \frac{l}{c} = \frac{0.03m \times 2}{3 \times 10^8 m/s} = 200ps \quad (2)$$

$$[0028] \quad N = \frac{20us}{1ns} = 2000 \quad (3)$$

$$[0029] \quad n = \frac{1ns}{80ps} = 12.5 \quad (4)$$

$$[0030] \quad \theta = \frac{0.75m \times 2}{3 \times 10^8 m/s} = 5ns \quad (5)$$

[0031] 行级共享架构的TDC的优势在于能够极大地减小像素尺寸,而缺点在于时序控制十分复杂。这其中最主要的问题在于:如果同一行有两个或者两个以上的像素同时响应(同时产生两个甚至更多的STOP信号),那么共享的细计数器会“忙不过来”,而且像素级粗计数器的数值也无法正常按顺序读出。

[0032] 对此给出的解决方案是,每个像素粗计数器的数值按照列选方式逐列读出,而同

一行的STOP信号由该行的一根公共总线经固定延时 θ 按地址顺序输入给行级细计数器,并由它最终串行输出写入行级寄存器 R_n 。同一行相邻两个像素间STOP信号的固定延时 θ 按照被测物水平方向上相邻两个像素点的前后距离差 $<0.75m$ 来确定,由公式5得出 θ 值为5ns,即在5ns的时间内保证下一个像素的STOP信号到来。这样,系统的帧频由列选读出32列像素级粗计数器数值的时间和行级细计数器处理完32个STOP信号的时间共同决定,且受限于两者之中的较大值。

[0033] 结合系统示意图1,最后给出该系统的读出时序图7。在主时钟Master Clock的控制下,系统启动信号System Start的上升沿表示整个系统已准备好开始工作;延时几个ns之后系统使能信号System EN的上升沿表示系统开始正式工作,在随后的20us内,它一直处于高电平,表示TDC就在这段高电平时间内工作;激光脉冲Laser Pulse与System EN同时刻发出,持续几百皮秒;TDC计数信号TDC START与激光脉冲同时开始,表示TDC在激光发射的同时刻开始计数;TDC计数信号TDC Count表示在使能期间TDC每加1就出现一个上升沿。选取一行当中的四个像素响应为例,Row STOP₁₋₄表示在这一行中随机出现的四个STOP信号,其中为了更具一般性,第二个和第三个STOP信号发生了重叠;每个像素内部的有源淬灭电路AQC会在本像素的STOP信号出现时同时开始淬灭工作,并在一段固定的死时间(Dead Time)后对本像素复位,以等待下一次光子的到来;行级共享细计数器(Fine Counter)按照本行像素的物理地址顺序,对需要处理的每个STOP信号按照相邻两个之间延时固定时间 θ 的原则进行处理;当系统使能信号System EN变为低电平后,系统读出信号Readout开始控制每行像素内的粗计数器逐列读出;当读出完成后,又可以进行激光发射以进行下一次光子的探测。由于发生雪崩击穿的APD器件处于不自持状态,不断增大的雪崩电流最终会烧坏器件,因此读出时序电路需要对信号超过阈值的每个APD器件匹配一个像素级的淬灭电路(Active Quenching Circuit,AQC),将APD的偏压降低以停止本次雪崩。淬灭电路还承担着自身APD探测器的复位功能,在淬灭完成后,经过固定的hold-off时间以减少后脉冲(after-pulsing)的影响,再将APD的偏压升高到超过雪崩电压,以等待下一次回波光子的来临。因此,两次激光脉冲的时间间隔由读出时间和淬灭电路工作时间中的较大者和测量范围共同确定。

[0034] 图8给出了本系统APD像素的读出时序电路示意图,其中APD的阴极与偏压 $V_{break}+V_{ex}$ 连接,阳极与淬灭电阻 R_s 连接, R_s 另一端与地相连;APD的阳极还与比较器(Comparator)的输入端连接,且通过淬灭开关(Quenching switch)与偏压 V_{ex} 相连;比较器的输出端输出STOP信号,且同时与延迟模块(Hold-Off)相连,并通过延迟模块控制复位开关(Recharging switch)对APD进行复位;复位开关的两端分别与 R_s 的两端相连。当APD处于雪崩状态时,比较器输出STOP信号并同时控制淬灭开关对APD淬灭,且控制延迟模块延时一段时间后,通过复位开关再对其进行复位,完成一次探测。在频率为50KHz以内的激光器辅助下,结合相应的光学系统和读出时序电路(如图8所示),能够针对 32×32 规模的Gm-APD阵列进行3000m以内物体的激光测距。

[0035] 尽管上面结合附图对本发明进行了描述,但是本发明并不局限于上述的具体实施方式,上述的具体实施方式仅仅是示意性的,而不是限制性的,本领域的普通技术人员在本发明的启示下,在不脱离本发明宗旨的情况下,还可以做出很多变形,这些均属于本发明的保护之内。

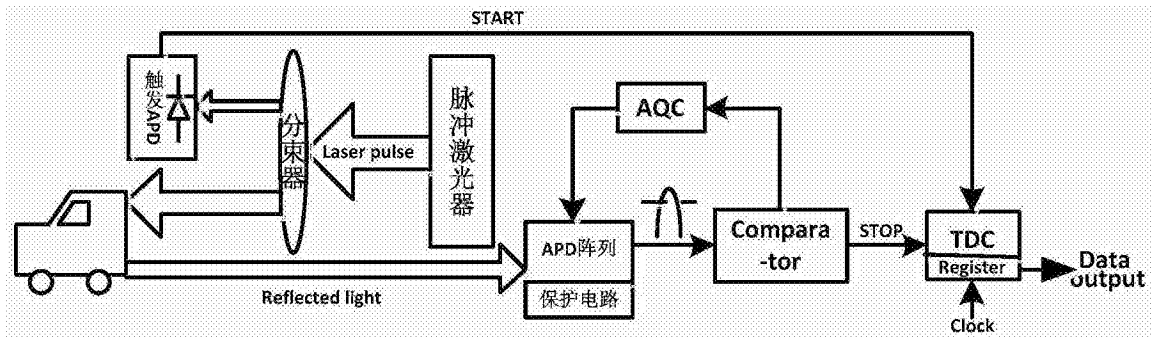


图1



图2

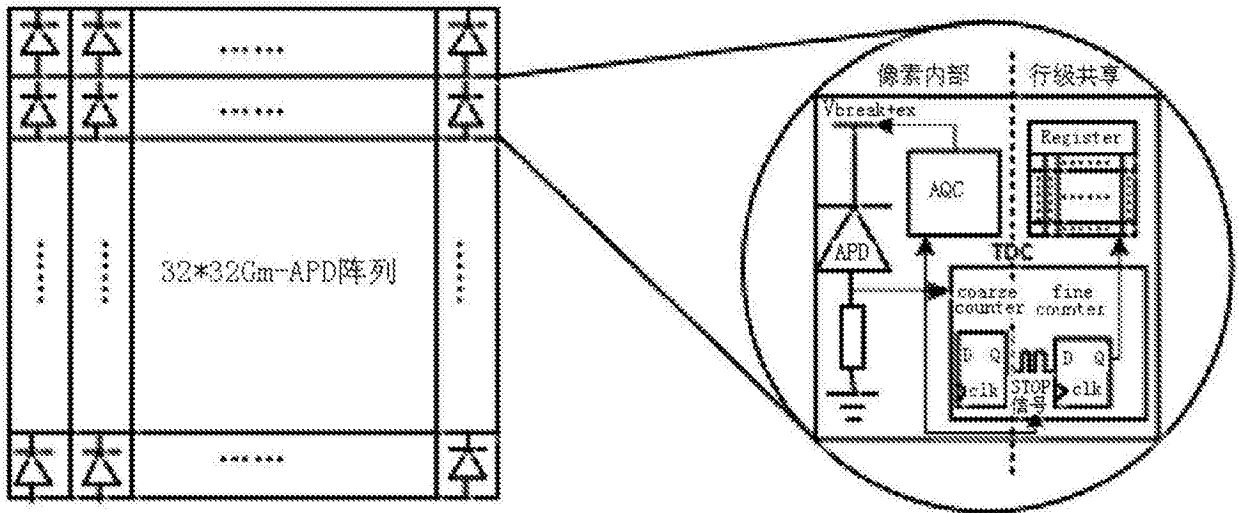


图3

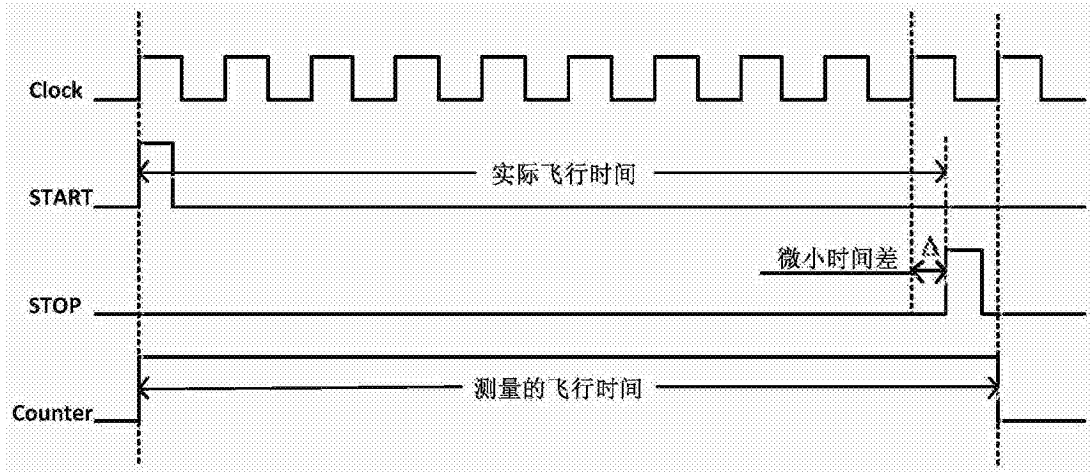


图4

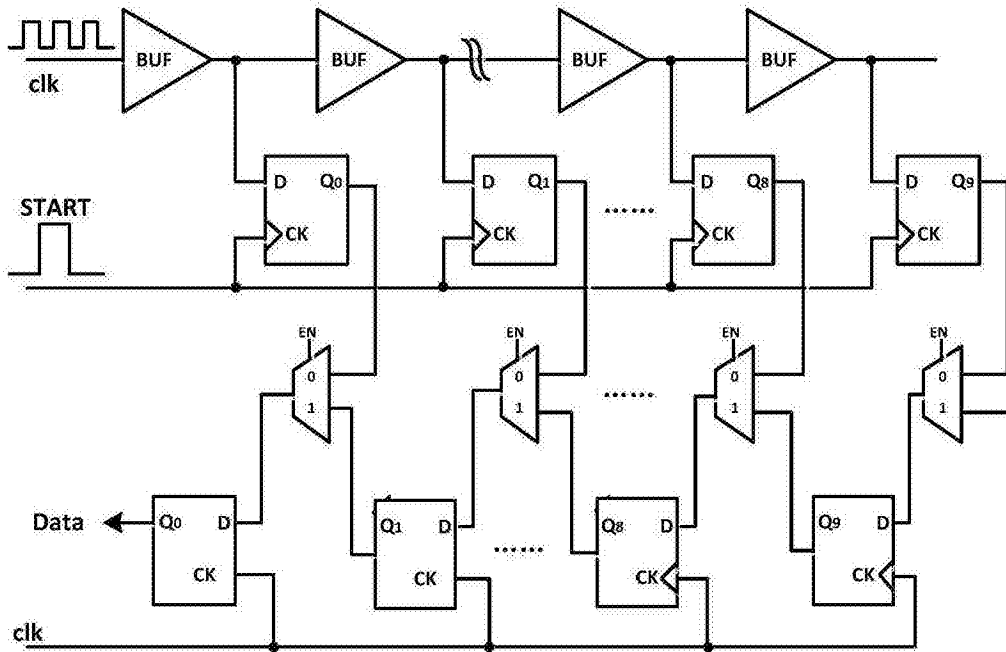


图5

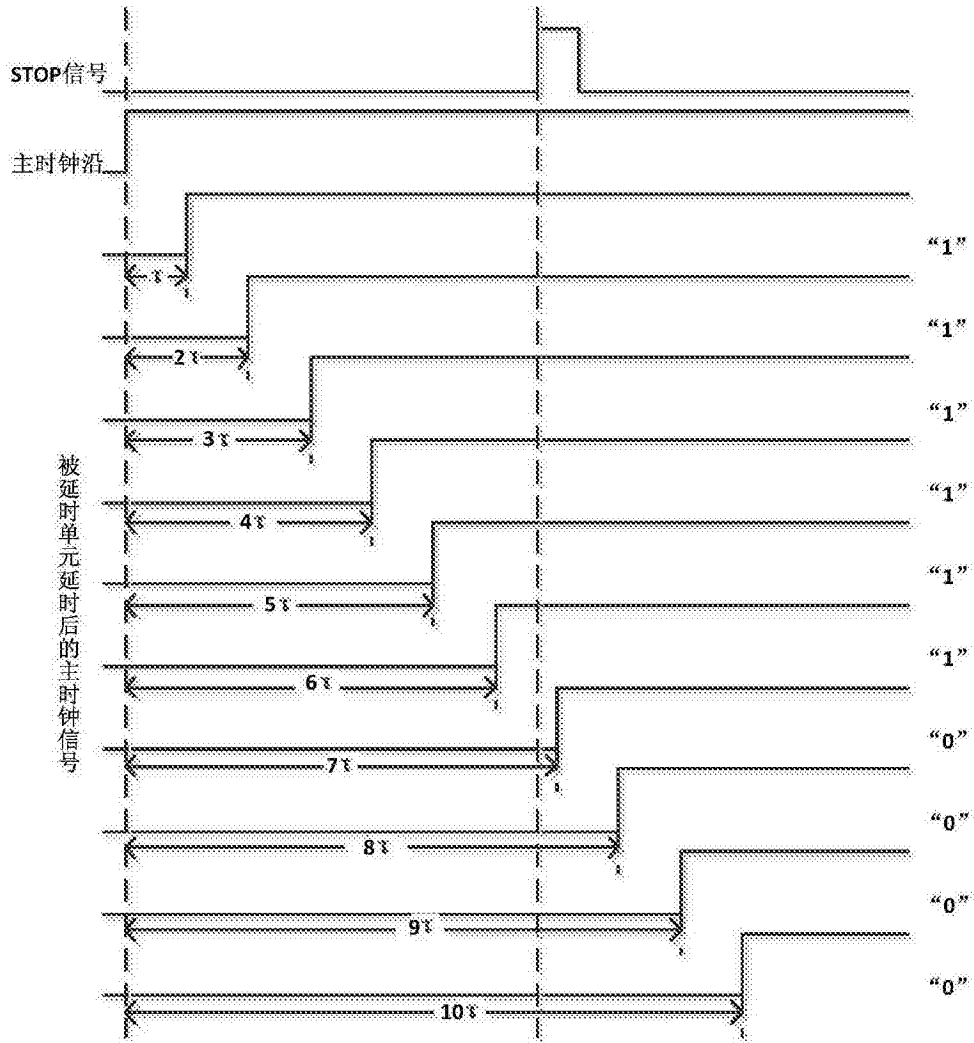


图6

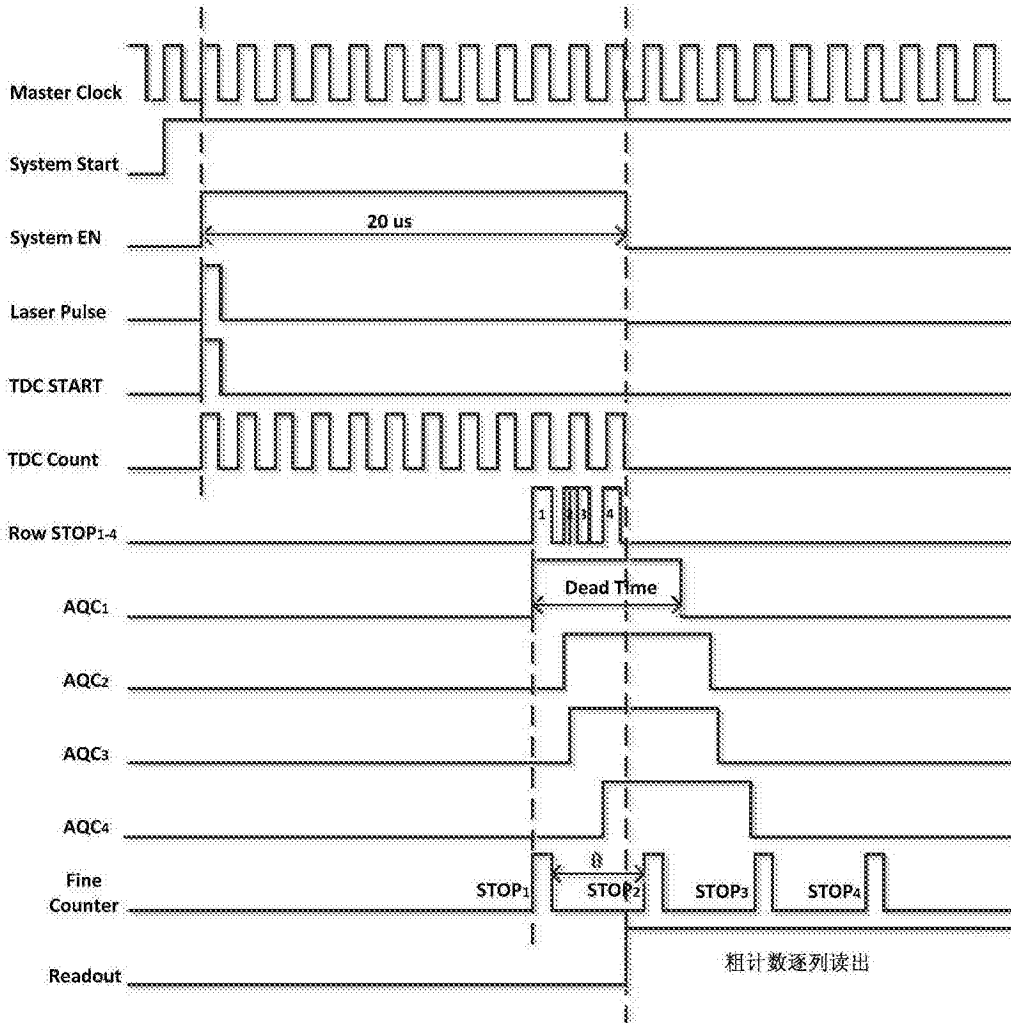


图7

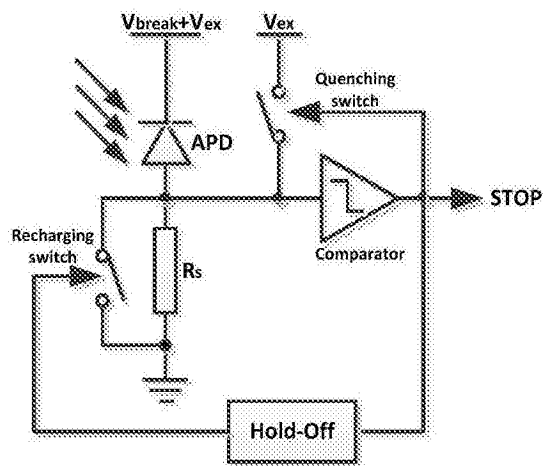


图8