

# 用于红外单光子探测的雪崩光电二极管 传输线抑制电路模型的理论分析<sup>\*</sup>

王金东<sup>†</sup> 吴祖恒 张 兵 魏正军 廖常俊 刘颂豪

(华南师范大学信息光电子科技学院光子信息技术广东省高校重点实验室 广州 510631)

(2007 年 11 月 28 日收到 2008 年 2 月 27 日收到修改稿)

结合利用雪崩光电二极管(APD)进行红外单光子探测电路模型的工作原理和特点以及传输线瞬态电脉冲产生的过程,提出了将传输线瞬态过程脉冲发生电路模型用于 APD 雪崩抑制的一种新方法,该方法可以实现利用 APD 门模工作方式对红外单光子探测的过程,主要从理论上计算了红外单光子信号入射 APD 时,传输线脉冲发生电路模型中负载电阻输出电脉冲的特点,讨论了传输线终端不同边界条件对输出电脉冲的影响,通过理论计算确定了这种利用 APD 进行红外单光子探测新模型的电路结构与参数,证明了该电路模型用于红外单光子探测 APD 门模工作方式的可行性.

关键词:红外单光子探测技术,雪崩光电二极管(APD),抑制电路,传输线瞬态过程

PACC:4250,4285F,0762,2940P

## 1. 引 言

单光子探测技术是量子信息科学研究与应用的关键技术,同时也在各种微弱信号测量领域中也有着广泛的应用.特别是红外通信波段,不仅因为在光纤中传输损耗很小,而且对人眼安全,应用范围很宽,包括天文物理,生物超微弱发光,大气环境检测和遥感测距等.从常规使用积分球那样的光子计数到量子信息所需确定量子态的单光子测量,在技术上有更高的要求.这包括两个方面:第一是要有高灵敏度的探测器,第二要有精密控制的测量技术.用雪崩光电二极管向红外方向拓展进行单光子探测是技术发展的主流方向.在光纤通信的 1550 nm 波段,基本上都采用 InGaAs/InP 倍增吸收分区<sup>[1]</sup>的雪崩光电二极管(APD).报道的探测效率一般在 10% 暗计数  $10^{-5}$  量级<sup>[2]</sup>.由于 Si-APD 可达 60% 的探测效率和  $10^{-6}$  的暗计数,因此有人用频率上转换技术采用 Si-APD 得到了高的探测效率<sup>[3]</sup>,但非线性过程的强背景带来了其他问题,不适合用于量子信息探测.在量子信息领域进行单光子探测,需要达到 1 比特/光子的探测

灵敏度,目前的 APD 器件可以在室温时和低于击穿电压 2 V 的工作电压下,暗电流小于 0.5 nA,时间分辨率达皮秒量级.已经发现市售的 APD 用于单光子探测还有许多问题有待解决,专门用于单光子探测的 APD 依然是在设计和改进研究中的器件.目前报道的大量研究工作是 APD 的使用技术.在操作上,使 APD 工作于击穿电压之上以开发探测器探测灵敏度的极限.在这种称为盖革模式的工作方式中,一种必要的技术是雪崩形成之后立刻得到抑制的技术.抑制电路的主要作用是,当 APD 接收到外来光子时发生雪崩输出电信号,同时外界电路必须在尽量短的时间内使得 APD 两端电压降至熄灭阈值以下来终止雪崩保护 APD 不被永久性击穿,然后在雪崩信号输出后电路对 APD 重新充电准备下一次测量.因此,抑制电路的研究是单光子探测的关键技术<sup>[4]</sup>.主要有三种方式的抑制电路:有源抑制<sup>[5]</sup>,无源抑制<sup>[6,7]</sup>和门模式<sup>[8]</sup>.在量子保密通信中,门模式的工作状态是必须的.这是一种同步检测技术,可以利用光子到达时间的确定性和随机背景脉冲的不确定来减小大量误码.由门脉冲的前沿启动单光子探测,使 APD 上工作电压高于雪崩击穿电压.在门模

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:G2001039302)教育部博士学科点专项科研基金(批准号:20050574001)和广东省工业攻关项目(批准号:2007B010400009)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: jindongwqkd@126.com

工作状态,暗计数率随门宽的增加而增加,因此减小门宽和提高同步性能都涉及精密高速电脉冲技术,而且雪崩时间的增长不但增加了载流子的俘获概率,增加后脉冲概率,而且可能导致 APD 的热损伤。考虑到光子到达时间的抖动,适当的门宽有利于提高单光子探测效率。因此,发展方向是研究门与抑制电路的组合。例如有源抑制与门的组合<sup>[9]</sup>和无源抑制与门的组合<sup>[10,11]</sup>。目前报道的无源抑制电路的基本思想主要是想办法优化电路的基本结构,但是电子线路工作频率的限制使得单光子探测器的探测速率受到了很大影响。我们提出有效利用相关快物理过程进行雪崩抑制,不但可以使电路变得简单,而且可使整个探测过程更加有效,包括更多地减小有效门时间和更好地限制雪崩时间,同时提高探测效率。本文研究利用传输线上的瞬态过程抑制雪崩并将这种雪崩抑制模型用于 APD 门控模式的一种新方法。

传输线瞬态过程的研究很早就引起了人们的广泛关注。很多人利用传输线的瞬态过程来产生脉宽很窄的电脉冲,可以选择不同的传输线结构和终端边界条件以及适当的开关器件来得到适合于不同应用领域的电脉冲<sup>[12-20]</sup>。利用传输线瞬态过程产生电脉冲的特点是,当在传输线终端选择适当的边界条件并且利用外界信号(电、光等信号)激励开关器件时,传输线会在很短的时间内产生电压行波来满足电磁场的边界条件,从而使得负载电阻上有一个上升沿很快的电脉冲输出,对于开关器件的作用结果是经过很小一段时间(亚纳秒数量级)后开关器件两端的电压迅速下降至熄灭阈值以下,并同时在负载上输出一个能够反映外界激励的信号。

将采用 APD 进行红外单光子探测的抑制电路与传输线瞬态过程进行结合,得到了一种新的抑制技术,这是一种更有效的门与无源抑制相结合的技术,也是一种利用 APD 作为开关器件的传输线脉冲形成技术。

## 2. 传输线瞬态过程抑制电路

在这部分我们将对 APD 替换开关器件后的传输线瞬态过程脉冲发生电路模型进行理论分析,得到在该电路模型中 APD 工作电压的变化情况以及单光子探测输出信号的解析解。根据得到的结果,我们对传输线抑制电路进行了改进以更适合利用 APD 进行单光子探测,对改进后的电路模型中可选择的

器件参数进行了理论模拟,得出了用于红外单光子探测传输线改进抑制电路的基本参数。

### 2.1. 传输线瞬态过程脉冲发生电路的一般模型

根据电磁场在传输线上的传播规律,由麦克斯韦方程组可以推导出无损耗均匀传输线上决定电压  $V(z, t)$  和电流  $I(z, t)$  的方程,即传输线方程为<sup>[21]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial z} V(z, t) = -L \frac{\partial}{\partial t} I(z, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} I(z, t) = -C \frac{\partial}{\partial t} V(z, t), \quad (2)$$

其中  $L, C$  分别表示传输线单位长度上的电感和电容。由传输线方程(1)式和(2)式,可得传输线上电压  $V(z, t)$  和电流  $I(z, t)$  的波动方程

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} - LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) V(z, t) = 0, \quad (3)$$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} - LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) I(z, t) = 0. \quad (4)$$

(3) 式为关于电压  $V(z, t)$  的二阶偏微分方程,其解可以写成如下形式:

$$V(z, t) = V_+(z - vt) + V_-(z + vt), \quad (5)$$

即传输线上的电压变化可以看作沿  $+\hat{z}$  和  $-\hat{z}$  方向传播的电压波的叠加,这些电压波的传播速度等于光速  $\left( v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \right)$ , 并且可以假设为任意的波形。

类似地,电流  $I(z, t)$  的波动解也可以表示成如下形式:

$$I(z, t) = I_+(z - vt) + I_-(z + vt). \quad (6)$$

根据(1)(2)两式可以得到电压行波和电流行波之间的定量关系,即

$$V_+ = Z_0 I_+, \quad (7)$$

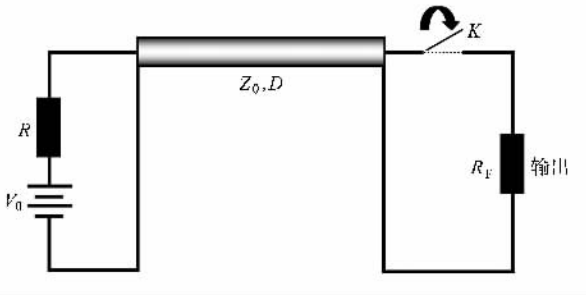
$$V_- = -Z_0 I_-, \quad (8)$$

式中  $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$  为传输线的特征阻抗。

将传输线上电压和电流分别看作电压行波和电流行波的叠加给传输线瞬态过程的分析带来了很大的方便。图 1 是一种常见的传输线电脉冲发生电路的原理图<sup>[21]</sup>。

图中传输线的特征阻抗为  $Z_0$ , 长度为  $D$ 。当图中开关  $K$  闭合时,在传输线终端将产生一个反向传播的电压行波  $V_-$  以满足终端负载  $R_F$  处的边界条件

$$V_0 + V_- = I_- R_F = \frac{-V_-}{Z_0} R_F. \quad (9)$$

图 1 一种常见的传输线电脉冲发生电路原理图<sup>[21]</sup>

由上式可得

$$V_- = \frac{-V_0}{1 + \frac{R_F}{Z_0}}, \quad (10)$$

即开关闭合时,传输线终端加在开关器件和负载电阻上的电压将由  $V_0$  变为

$$V_0 + V_- = \frac{R_F}{Z_0 + R_F} V_0, \quad (11)$$

与此同时,负载电阻上的电压也由零变为

$$V_{R_F} = \frac{R_F}{Z_0 + R_F} V_0.$$

反向传播的行波在  $t = \frac{D}{v}$  时刻被传输线源端反射后继续向终端传播,  $t = \frac{2D}{v}$  时刻到达终端. 根据传输线反射系数的定义, 我们知道, 当终端负载和传输线特征阻抗  $Z_0$  的大小相等时, 到达终端的电压行波将全部被终端负载吸收, 不再产生反射行波. 为获得质量较好的脉冲, 我们一般取终端负载等于传输线特征阻抗  $Z_0$ , 而在源端, 为了达到完全反射的目的, 一般取  $R \gg Z_0$ , 此时开关每动作一次就产生一个如图 2 所示的电脉冲, 此电脉冲脉宽为  $\frac{2D}{v}$ , 由所用传输线的材料、结构和长度决定, 由于电压行波传输速度为光速, 所以通过此方法产生的脉冲可以达到很小的脉宽.

以上我们假设装置中所用开关器件为理想开关, 终端边界条件只考虑阻性效应. 实际上, 在传输线脉冲发生的实际电路中, 图 1 中的开关不可能是理想开关, 而且由于电路分布电容的影响, 终端边界条件的容性效应也必须考虑. 和理想情况不同的是, 实际开关器件会具有一定的导通电阻, 不可能像理想开关那样, 导通电阻为零. 另一方面, 考虑到电路有分布电容和开关器件电容效应的影响, 使得负载在电压从零变为一定值时所用的时间并不是零, 这

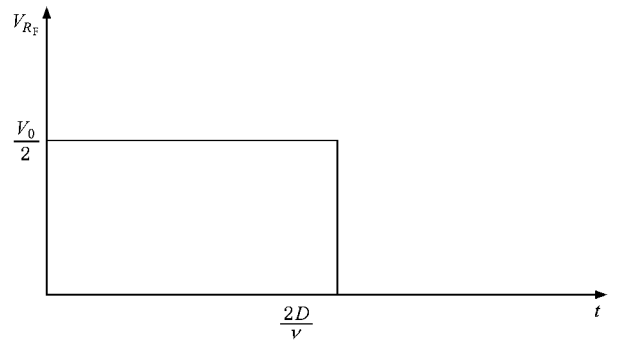


图 2 传输线装置所得电脉冲的理论波形

个脉冲的上升时间由传输线以及终端边界条件的阻抗效应所决定. 我们采用电子开关或光电开关进行实验, 发现利用外界周期性光信号或电信号的驱动作用下使得开关器件周期性工作, 能够成功产生较短的电脉冲<sup>[19, 20]</sup>, 导通电阻和分布电容的影响也已经在文献 [19] 中进行了分析.

可见, 传输线装置产生电脉冲的特点是: 当外界周期性信号(光信号或电信号)激励终端开关器件使得传输线终端边界条件发生突变时, 可以在负载电阻上输出能够反映外界激励信号的电脉冲, 同时开关器件上的电压会在很短的时间内(目前可以达到亚纳秒量级)下降到一个较低的水平, 使得开关器件关断以保护开关器件, 之后重新对开关器件充电以准备接收下一个激励信号.

## 2.2. 传输线抑制电路的结构

利用 APD 进行单光子探测, 一般使 APD 工作于雪崩电压之上以开发其极限灵敏度, 这也就是我们常说的盖革模式<sup>[22, 23]</sup>.

在盖革模式下, APD 产生的雪崩若不加抑制会给整个 APD 造成击穿性损害, 为保证探测器连续、正常工作, APD 控制电路必须具有以下功能<sup>[23]</sup>:

- 1) 能捕捉到 APD 雪崩脉冲的上升沿;
- 2) 能产生一个与雪崩上升沿同步的可鉴别的输出;
- 3) 能以足够快的速度将 APD 两端偏压降低到低于雪崩电压, 以抑制雪崩;
- 4) 在一定时间之后将 APD 偏压恢复到正常工作状态以准备下一次测量.

根据传输线脉冲发生电路模型的特点, 我们将 APD 作为传输线装置中的开关器件. 首先通过传输线装置将 APD 置于雪崩电压之上的偏压, 当单光子

信号入射 APD 时, APD 发生雪崩, 从而导致传输线终端边界条件突然变化, 根据传输线装置的工作特点, 会在负载电阻上输出一个电信号并同时使加在 APD 两端的偏压下降至熄灭阈值之下以抑制雪崩, 外界激励信号消失后, 传输线重新对 APD 充电以准备下一次光信号的探测。

用于红外单光子探测的传输线抑制电路基本结构如图 3 所示. 其中虚线框部分为 APD 的等效电路结构, 和文献 [22] 中 APD 的等效电路不同的是, 我们去掉了其中的等效电压源  $V_b$ , 因为这个等效电压源只是表示一个势垒的作用, 并没有真正起到一个电压源的作用. 图中  $Z_0$  为传输线特征阻抗, 我们取常用的  $50 \Omega$  同轴电缆, 要求  $R_L \gg Z_0$  以减小由于电磁行波反射带来的杂散脉冲.  $K$  为 APD 内部等效理想开关, 当光子入射 APD 时  $K$  处于闭合状态, 无光子入射时,  $K$  断开.  $R_d$  为 APD 内阻, 一般为几百到

一千欧姆,  $C_d$  为 APD 工作时的等效电容, 数量级一般在  $\mu\text{F}$  量级, 因所用 APD 具体型号而异.  $R_s$  为信号输出电阻, 为了后续信号的输出和处理方便, 一般取值为  $50 \Omega$ . 和 2.1 节中传输线装置电路相比, 我们在传输线终端并联了电阻  $R_0$  和电容  $C_s$ , 其中  $R_0$  的作用是根据传输线上电压行波传输与反射的特点进行的终端匹配, 可以减小负载端反射带来的杂散脉冲, 减小单光子探测的误码率. 电路中总是存在分布电容, 一般对 APD 进行等效电路分析时, 都要在 APD 和信号电阻上并联分布电容 [22], 还有文献提出, 探测电路工作时, 并联电容不一定越小越好, 甚至并联更大量级的电容 [24]. 我们通过理论计算得出电路中各参数相互关系的解析解, 然后进行分析, 在理论上确定各电子元件对单光子探测的影响, 得出最佳电路结构和电路参数.

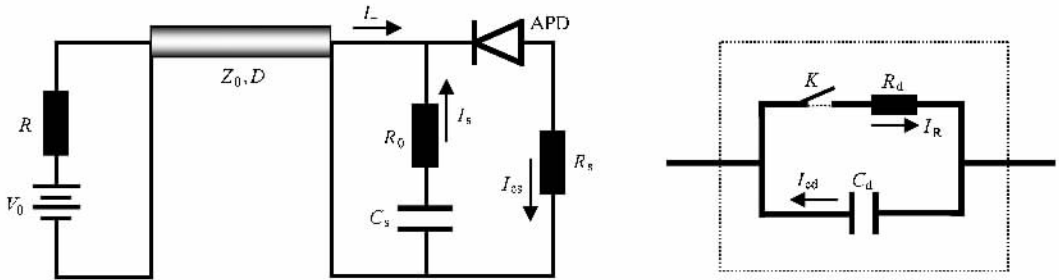


图 3 用于红外单光子探测的传输线抑制电路结构图

### 2.3. 传输线抑制电路输出信号和抑制电压的变化

电源  $V_0$  首先通过传输线对 APD 进行充电, 使 APD 两端偏压处于雪崩电压之上, 光子入射, 开关  $K$  闭合, 传输线负载终端各参量参考方向如图 3 所示. 传输线的终端为满足电磁波新的边界条件, 将产生一个反向电压行波  $V_-$ , 即传输线终端的电压变为  $V_0 + V_-$ , 由传输线理论可知, 传输线终端的电流可表示为

$$I_- = -\frac{V_-}{Z_0}, \quad (12)$$

对并联电容  $C_s$  有

$$I_{cs} = -C_s \frac{dU_{cs}}{dt}, \quad (13)$$

其中

$$U_{cs} = V_0 + V_- + I_{cs} R_0. \quad (14)$$

把 (14) 式代入 (13) 式, 化简可得

$$I_{cs} = -C_s \frac{dV_-}{dt} - C_s R_0 \frac{dI_{cs}}{dt}. \quad (15)$$

流过 APD 内阻  $R_d$  的电流为

$$I_R = I_{cs} + I_- + I_{cd}. \quad (16)$$

流过负载  $R_s$  的电流为

$$I_s = I_{cs} + I_-. \quad (17)$$

APD 两端的电压为

$$U_{cd} = V_0 + V_- - V_s. \quad (18)$$

则 APD 结电容放电电流可表示为

$$\begin{aligned} I_{cd} &= -C_d \frac{dU_{cd}}{dt} \\ &= -C_d \frac{Z_0 + R_s}{Z_0} \frac{dV_-}{dt} + C_d R_s \frac{dI_{cs}}{dt}. \end{aligned} \quad (19)$$

由基尔霍夫电压定律, 传输线负载终端的电压关系为

$$V_0 + V_- = I_R R_d + I_s R_s. \quad (20)$$

把 (16) (17) 式代入 (20) 式, 可得

$$V_0 + V_- = (R_d + R_s)I_{cs} - \frac{R_d + R_s}{Z_0}V_- + C_d R_s R_d \frac{dI_{cs}}{dt} - C_d \frac{Z_0 + R_s}{Z_0} R_d \frac{dV_-}{dt}. \quad (21)$$

对(21)式两边求导

$$C_d \frac{Z_0 + R_s}{Z_0} R_d \frac{d^2 V_-}{dt^2} + \frac{Z_0 + R_s + R_d}{Z_0} \frac{dV_-}{dt} = C_d R_s R_d \frac{d^2 I_{cs}}{dt^2} + (R_s + R_d) \frac{dI_{cs}}{dt}, \quad (22)$$

由(15)式可知

$$\frac{dv_-}{dt} = -R_0 \frac{dI_{cs}}{dt} - \frac{I_{cs}}{C_s}. \quad (23)$$

把(23)式代入(22)式,整理合并可得

$$\alpha \frac{d^2 I_{cs}}{dt^2} + \beta \frac{dI_{cs}}{dt} + \gamma I_{cs} = 0. \quad (24)$$

为了方程形式简单,我们定义了三个系数,其中

$$\alpha = \frac{C_d R_0 R_s R_d + C_d R_0 Z_0 R_d + C_d Z_0 R_s R_d}{Z_0},$$

$$\beta = \frac{Z_0 + R_s + R_d}{Z_0} R_0 + C_d \frac{Z_0 + R_s}{Z_0 C_s} R_d + R_d + R_s,$$

$$\gamma = \frac{Z_0 + R_s + R_d}{Z_0 C_s}.$$

方程(24)的通解为

$$I_{cs} = C_1 e^{-\frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} t} + C_2 e^{-\frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} t}. \quad (25)$$

由  $V_-$  与  $I_{cs}$  的关系可得

$$V_- = -C_1 \left( R_0 + \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\gamma C_s} \right) e^{-\frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} t} + C_2 \left( \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\gamma C_s} - R_0 \right) e^{-\frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} t} + C_3. \quad (26)$$

由初始条件  $I_{cs}(0) = 0, V_-(0) = 0$ , 可以求出式中三个常系数的值为

$$C_1 = -\frac{V_0}{\sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}},$$

$$C_2 = -C_1 = \frac{V_0}{\sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}},$$

$$C_3 = -\frac{V_0}{\gamma C_s}.$$

我们感兴趣的是负载电阻上输出的电压信号以及 APD 上偏压的变化情况,利用已得出的  $I_{cs}$  和  $V_-$  可以将负载电阻和 APD 上的电压变化情况表示出来,

$$V_s = I_s R_s = (I_{cs} + I_-) R_s = \left( I_{cs} - \frac{V_-}{Z_0} \right) R_s$$

$$= \frac{V_0 R_s}{\gamma C_s Z_0} - \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma} - 2\gamma C_s (R_0 + Z_0)}{2\gamma C_s Z_0 \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}} R_s V_0 e^{\frac{(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma})}{2\alpha} t}$$

$$- \frac{\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma} + 2\gamma C_s (R_0 + Z_0)}{2\gamma C_s Z_0 \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}} R_s V_0 e^{\frac{(-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma})}{2\alpha} t}, \quad (27)$$

$$U_{APD} = V_0 + V_- - I_s R_s = V_0 + V_- - \left( I_{cs} - \frac{V_-}{Z_0} \right) R_s = V_0 - \frac{V_0}{\gamma C_s} - \frac{V_0 R_s}{\gamma C_s Z_0}$$

$$+ \frac{[(-\beta + 2\gamma C_s R_0)Z_0 + (R_s + Z_0)\sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma} - R_s(\beta - 2\gamma C_s R_0 - 2\gamma C_s Z_0)]}{2\gamma C_s Z_0 \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}} V_0 e^{\frac{(-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma})}{2\alpha} t}$$

$$+ \frac{[(\beta - 2\gamma C_s R_0)Z_0 + (R_s + Z_0)\sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma} + R_s(\beta - 2\gamma C_s R_0 - 2\gamma C_s Z_0)]}{2\gamma C_s Z_0 \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}} V_0 e^{\frac{(-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma})}{2\alpha} t}. \quad (28)$$

## 2.4. 电路参数的选取

利用我们通过理论计算得出的输出信号和 APD 上电压变化的理论公式,只要确定了公式中的电路参数,就可以将抑制电路的输出信号和 APD 上电压的变化情况用曲线表示出来,进而可以根据需要调

整电路参数,以达到最好的抑制效果,提高单光子探测器的性能.

根据我们所用 JDSU 公司 APD 的参数,我们取  $C_d = 0.25$  pF,  $R_d = 1000$   $\Omega$ , 雪崩电压假设为 50 V. 图 3 中  $R_L$  一般取 20—50 k $\Omega$ , 使得从负载端传来的电压行波可以基本被完全反射.  $R_s$  为信号输出电阻,

一般取值为  $50 \Omega$ . 对于传输线终端并联的电阻  $R_0$  可以根据传输线反射系数的公式算得为  $52.5 \Omega$ . 根据上述电路参数取值, 来讨论电容  $C_s$  取不同值时 APD 电压的变化情况和信号电阻上输出的电脉冲的变化情况, 因为我们更关心 APD 发生雪崩时电压抑制的效果以及输出电脉冲上升沿的情况, 所以在模拟结果中只给出 APD 电压抑制情况和输出电脉冲的上升沿. 将上述电参数取值代入(27)和(28)式, 并使  $C_s$  取从  $1 \text{ pF}$  到  $1 \mu\text{F}$  的不同电容值, 可以得到 APD 上电压变化情况和输出电脉冲上升沿的比较图, 如图 4 和图 5 所示.

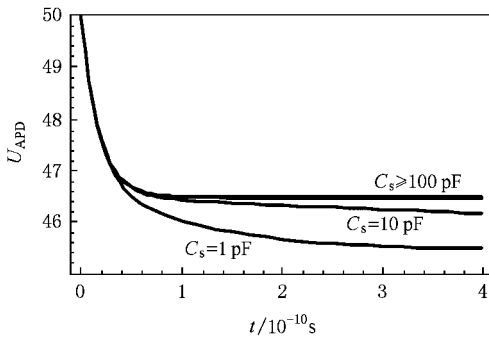


图 4  $C_s$  取不同值时 APD 抑制电压随时间的变化关系

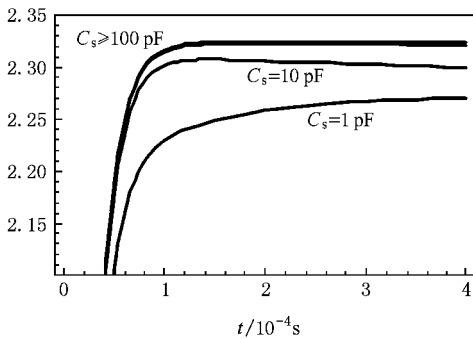


图 5  $C_s$  取不同值时输出电脉冲上升沿随时间的变化关系

从图 4 和图 5 可以看出, 当并联电容  $C_s$  取值为  $1 \text{ pF}$  时, 传输线抑制电路在 APD 发生雪崩时可以使 APD 上的电压在  $300 \text{ ps}$  左右的时间从雪崩电压  $50 \text{ V}$  降至  $45.5 \text{ V}$ , 而输出电脉冲的电压也在  $300 \text{ ps}$  左右的时间达到最大. 当  $C_s$  取值增大到  $100 \text{ pF}$  以上时, APD 雪崩抑制电压和电脉冲上升沿不再有明显变化, 都在  $100 \text{ ps}$  左右的时间达到最低的抑制电压 ( $46.5 \text{ V}$ ) 和最大的电压输出 ( $2.33 \text{ V}$ ).

通过以上分析可以看到, 这种新型的单光子探测控制电路可以使得 APD 在发生雪崩时很短的时间 ( $100 \text{ ps}$ ) 内雪崩得到抑制并且同时在信号电阻上输出一个电信号.

## 2.5. 采用传输线抑制方法的 APD 门控模式电路模型

如果采用门控方式, 输出信号极快的上升沿可以提高门控精度, 有效降低单光子探测器的误码率. 图 6 为采用传输线抑制方法的 APD 门控模式电路模型原理图. 电源  $V_0$  取值略低于雪崩电压, 在准备阶段, 电源  $V_0$  通过传输线对 APD 充电, 使得 APD 上的电压略低于雪崩电压而不能发生雪崩. 当单光子脉冲入射 APD 时, 在 APD 上叠加一个同步的电压脉冲信号, 如果 APD 被单光子脉冲触发雪崩, 则会由于传输线上瞬态过程的作用使得 APD 上的电压迅速下降至雪崩电压以下来达到雪崩抑制的目的, 并同时输出电阻上得到一个电脉冲. 之后电源  $V_0$  重新对 APD 进行充电, 以准备接收下一个单光子脉冲. 传输线抑制电路的特点是抑制过程非常快, 并同时具有较短的死时间, 这个特点可以有助于提高单光子探测器的探测速率, 并可有效降低其误码率, 快速抑制过程同样使得门宽可以达到很短的程度, 对后脉冲也有一定的抑制作用.

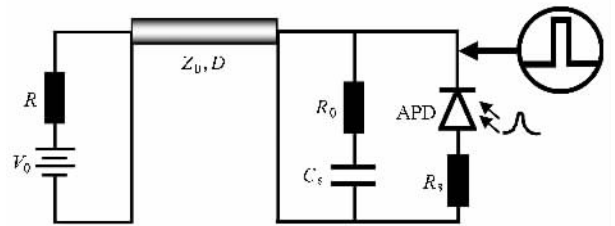


图 6 采用传输线抑制方法的 APD 门控模式电路模型原理图

## 3. 结 论

我们将雪崩光电二极管 (APD) 红外单光子探测电路模型和传输线瞬态电脉冲产生过程相结合, 提出了将传输线瞬态过程脉冲发生电路模型用于 APD 雪崩抑制的一种新方法以及将这种抑制方法用于门控模式的电路模型. 该电路模型将传输线瞬态物理过程作为 APD 单光子探测无源抑制的新手段, 是一种更有效的门与无源抑制相结合的技术.

- [ 1 ] Hiskett P A , Buller G S , Loudon A Y 2000 *Applied Optics* **39** 6818
- [ 2 ] Grigoire Riborly , Nicolas Gisin , Olivier Guimardy 2004 *Journal of Modern Optics* **51** 1381
- [ 3 ] Eleni Diamanti , Carston Langrock , Fejer M M 2006 *Opt. Lett.* **31** 727
- [ 4 ] Cova S , Ghioni M , Lacaíta A 1996 *Applied Optics* **35** 1956
- [ 5 ] Brown R G W , Jones R , Rarity J G 1987 *Applied Optics* **26** 2383
- [ 6 ] Brown R G W , Ridley K D , Rarity J G 1986 *Applied Optics* **25** 4122
- [ 7 ] Rarity J G , Wall T E , Ridley K D 2000 *Applied Optics* **39** 6746
- [ 8 ] Gregoire Riborly , Jean-Daniel Gautier , Hugo Zbinden 1998 *Applied Optics* **37** 2272
- [ 9 ] Maurizio Viterbini , Sergio Nozzoli , Massimo Poli 1996 *Applied Optics* **35** 5345
- [ 10 ] Rubens Viana Ramos , George André Pereira Thé 2001 *Technical Report of IEICE* **64** 7
- [ 11 ] Naoto Namekata , Yuuki Makino , Shuichiro Innoue 2003 *Electronics and Communications in Japan* , Part 2 **86** 10
- [ 12 ] Brito Cruz C H , Palanget E , A Balbin Villaverde 1984 *Apparatus and techniques* **17** 105
- [ 13 ] Zhang Q G , Qiu Y C , Feng Y P 1996 *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy* **15** 1 ( in Chinese ) [ 张乔根、邱毓昌、冯允平 1996 电工电能新技术 **15** 1 ]
- [ 14 ] Lee C H 1977 *Appl. Phys. Lett.* **30** 84
- [ 15 ] Chang C S , Mathur V K , Rhee M J , Lee C H 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 392
- [ 16 ] Tae-In Jeon , Grischkowsky D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 6092
- [ 17 ] Osbahr C J , Larsen B H , Thorsten Holst 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1892
- [ 18 ] Auston D H 1975 *Appl. Phys. Lett.* **26** 101
- [ 19 ] Wang J D , Guo J P , Liao C J 2004 *Journal of South China Normal University* ( Natural Science Edition ) **106** 59 ( in Chinese ) [ 王金东、郭健平、廖常俊 2004 华南师范大学学报( 自然科学版 ) **106** 59 ]
- [ 20 ] Wang J D , Liao C J , Guo J P 2005 *Scope on acta photonica sinica* **Z1** 66 ( in Chinese ) [ 王金东、廖常俊、郭健平 2005 光子学报 **Z1** 66 ]
- [ 21 ] Kong J A 2002 *Electromagnetic Wave Theory* ( Beijing : Higher Education Press )
- [ 22 ] Zhang P F , Zhou J Y , Liao C J 2003 *Optoelectronic Technology & Information* **12** 6 ( in Chinese ) [ 张鹏飞、周金运、廖常俊 2003 光电子技术与信息 **12** 6 ]
- [ 23 ] Guo J P , Liao C J , Wang J D 2005 *Laser & Optoelectronics Progress* **42** 8 ( in Chinese ) [ 郭健平、廖常俊、王金东 2005 激光与光电子学进展 **42** 8 ]
- [ 24 ] Akio Yoshizawa and Hidemi Tsuchida 2001 *Technical Report of IEICE LQE* **64** 7

## A new circuit model for avalanche photodiodes to detect infrared single photon by transient process of transmission lines<sup>\*</sup>

Wang Jin-Dong<sup>†</sup> Wu Zu-Heng Zhang Bing Wei Zheng-Jun Liao Chang-Jun Liu Song-Hao

( Laboratory of Photonic Information Technology , School for Information and Optoelectronic Science and Engineering ,

South China Normal University ,Guangzhou 510631 ,China )

( Received 28 November 2007 ; revised manuscript received 27 February 2008 )

### Abstract

A new circuit model for using the avalanche photodiodes to detect infrared single photon is proposed , which combines the requirements of a single photon detector control circuit and features of the electric pulses generator by transient process of transmission lines. The simulation results are given for the new circuit model and the emphasis is laid on the analysis of the feasibility of the circuit model in using the gate mode scheme of the avalanche photodiodes to detect infrared single photon and the influence of each electrical component on the performance of the circuit model. Finally , optimal parameters of the electrical components and the gate-mode with the quenching circuit model are demonstrated.

**Keywords** : infrared single photon detection , avalanche photodiode ( APD ) , quenching circuit , transient process of the transmission lines

**PACC** : 4250 , 4285F , 0762 , 2940P

<sup>\*</sup> Project supported by the National 973 Project of China ( Grant No. G2001039302 ) , the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant No. 20050574001 ) and Guangdong Key Technologies R&D Program ( Grant No. 2007B010400009 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : jindongwqkd@126.com