

# 同轴电缆反射方案单光子探测器的特性研究<sup>\*</sup>

程楠 黄刚锋 王金东 魏正军<sup>†</sup> 郭健平 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)

(2009 年 6 月 18 日收到; 2009 年 12 月 1 日收到修改稿)

分析了用于消除门控单光子探测器电尖峰噪声的同轴电缆反射方案的特性. 重点分析了该方案中, 雪崩光电二极管的偏置电压和输出信号的变化特性. 根据理论分析的结果, 给出了不同的单光子信号与两个门控脉冲的时序关系的确定依据, 以及该方案对电尖峰噪声的消除效果, 同时给出了探测系统的最小探测周期. 并对理论分析的结果进行了实验验证, 实验中测得尖峰噪声的抑制比为 25.1 dB, 实验结果与理论分析相符. 这些分析结果将有助于红外单光子探测器的设计和性能的优化.

**关键词:** 单光子探测器, 雪崩光电二极管, 消除电尖峰噪声

**PACC:** 0762, 0367

## 1. 引 言

随着量子信息技术的兴起, 围绕工作于通信波段的红外单光子探测器的研究工作更加活跃起来. 工作于通信波段的红外单光子探测器的研究不但有助于推动量子信息技术的发展, 还在高分辨率的光谱测量、非破坏性物质分析、高速现象检测、精密分析、大气测污、生物发光、放射探测、高能物理、天文测光、光时域反射 (OTDR) 等领域有着广泛的应用. 由于单光子探测技术在高技术领域的重要地位, 它已经成为各发达国家光电子学界重点研究的课题之一<sup>[1-11]</sup>.

在光通信的红外波段, 得到最广泛的研究和应用的单光子探测器件是吸收和倍增分区的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD). 因为 InGaAs/InP APD 的后脉冲问题, 目前用于红外波段的单光子探测的 APD 都是采用门控模式的偏置方式. 在门控模式下, APD 通过直流偏压, 被偏置于略低于雪崩电压的状态, 只有当光信号到达时, 才通过一个门控脉冲与直流偏压叠加, 使 APD 的偏置电压高于雪崩击穿电压, 从而获得足够大的增益, 进行单光子探测. 但是由于高速的门控脉冲通过 APD 的结电容耦合到负载电阻上, 电路的微分效应在门控脉冲的上升和下降沿分别产生正负的电尖峰. 这就引入了新的噪声源——电尖峰噪声. 电

尖峰幅度可能超过幅度甄别器的阈值, 导致错误的计数. 所以, 门控脉冲导致的电尖峰噪声问题是降低门控模式单光子探测器性能的主要问题<sup>[3]</sup>.

为了消除电尖峰噪声的影响, 国内外采用了很多方案, 如电容平衡相消方案<sup>[4]</sup>、电缆脉冲叠加相消方案<sup>[5]</sup>、APD 平衡相消方案<sup>[6]</sup>、优化的电缆脉冲叠加相消方案<sup>[7]</sup>、放电脉冲甄别方案<sup>[8]</sup>、正弦波门控技术<sup>[9]</sup>、自差分方案<sup>[10]</sup>和积分门控方案<sup>[11]</sup>. 其中, 电缆脉冲反射叠加相消方案具有抑制噪声电路简单, 同时具有电尖峰消除效果与 APD 和门控脉冲的参数无关的优点, 因此得到广泛的应用, 研究和改进<sup>[12]</sup>. 但是一直缺乏这种方案的具体的理论研究, 对于电尖峰的消除效果, 和 APD 在工作模式下偏置电压的变化情况, 门控脉冲与单光子信号的时序关系, 输出电信号与系统结构参数的关系等问题没有定量的分析. 本文具体分析了同轴电缆反射方案的特性, 重点研究了单光子信号与门控脉冲的时序关系, 以及完全消除电尖峰的条件. 根据分析结果, 讨论了如何优化这一方案.

## 2. 方案的原理和过程分析

### 2.1. 同轴电缆反射法的原理

利用两根同轴电缆线反射信号的方法来消除

<sup>\*</sup> 广东省工业攻关项目 (批准号: 2007B010400009), 广州市科技支撑计划 (批准号: 2008Z1-D501) 资助的课题.

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

尖峰噪声的原理如图 1 所示, APD 的阳极和阴极分别连着两根等长的同轴电缆, 电缆长度一般为 1—1.5 m<sup>[5]</sup>. 连接 APD 阳极的电缆另一端短路, 连接 APD 阴极的电缆另一端开路.

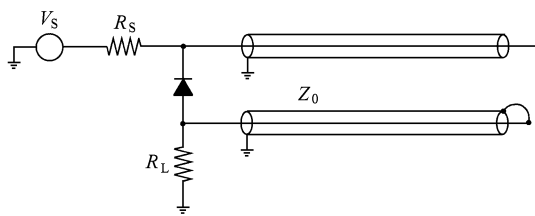


图 1 同轴电缆反射法的原理图

图中,  $V_S$  是门控脉冲发生器的信号源, 设信号源是一个内阻为零的理想脉冲电压源.  $R_S$  是终端开路的电缆的源端阻抗匹配电阻,  $R_L$  是负载电阻它也起着终端短路电缆的源端阻抗匹配的作用. 电缆的等效阻抗为  $Z_0$ , 长度均为  $l$ . 假设信号从电缆的一端传播到另一端时, 信号的幅度衰减为原来的  $k$  倍,  $k \leq 1$  且  $k$  为常数. 信号脉冲的宽度  $W$  为 1—2 ns<sup>[5]</sup>, 当信号的脉冲宽度远小于信号在电缆中的传输时间时, 脉冲信号在电缆中传输只是在时间上发生延迟, 并且因为损耗而在幅度上有所衰减, 而信号脉冲的形状不发生变化.

根据图 1, 在一个探测周期内, 探测系统的工作可以分为三个过程. 设电路从 0 时刻开始工作:

1) 当  $t=0$  时刻, 门控脉冲信号经过  $R_S$  加载到 APD 的阴极, 使 APD 的偏置电压在雪崩击穿电压之上, 从而能够响应单光子信号. 门控脉冲同时输入终端开路的同轴电缆. 门控脉冲的另一部分通过 APD 的结电容耦合到负载电阻  $R_L$  上, 负载电阻上获得第一次信号脉冲的电压, 信号脉冲同时输入终端短路的同轴电缆. 设传输线的延迟时间为  $T_0$ , 在  $t=T_0$  时刻信号分别到达电缆的终端, 在终端开路电缆中的信号被同向反射回来, 在终端短路电缆中的信号则被反向反射回来.

2) 在  $t=2T_0$  时刻, 门控脉冲经过终端开路电缆反射后回到 APD 的阴极, 使 APD 的偏置电压再次达到雪崩击穿电压之上, 因此也可以用来探测单光子信号. 反射回来的门控脉冲通过 APD 的结电容耦合到负载电阻  $R_L$  上, 和终端短路电缆反射后的脉冲信号叠加, 在负载电阻  $R_L$  上产生第二个信号脉冲的电压. 同时脉冲输入两根电缆, 在  $t=3T_0$  时刻分别到达两根电缆的终端, 在并在两根电缆的终端发生

反射.

3) 在  $t=4T_0$  时刻, 分别经过两根电缆反射后的脉冲再次到达 APD 两极. 通过后面的分析可以看出, 此时 APD 的和电压为零, APD 不会发生雪崩. 同时由于两根电缆反射回来的信号脉冲叠加相消, 电缆上没有向终端传输的信号脉冲.

## 2.2. 同轴电缆反射法的过程分析

分析电路时, 采用拉普拉斯变换, 把时域信号经过拉普拉斯变换为频域信号, 在分析结果时再将频域信号转换为时域信号. 文中小写字母表示的变量均表示时域信号, 大写字母表示的变量均为频域信号. 分别分析上述的三个过程.

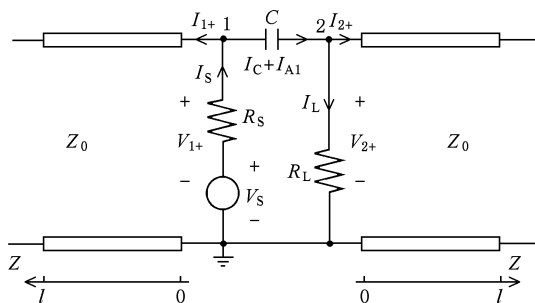


图 2 过程一的等效电路图

1) 如图 2 所示, 在  $t=0$  时刻, 门控脉冲加载到 APD 的阴极, 在  $0 \leq t < 2T_0$ , 假设 APD 在第一个门控脉冲期间探测到单光子信号, 产生雪崩, 因为 APD 的雪崩过程是一个复杂的随机过程<sup>[13]</sup>, 设雪崩电流为  $i_{A1}(t)$ , 同时设  $i_{A1}(t)$  的拉普拉斯变换为  $I_{A1}(s)$ , 利用结点电压法, 设接地点为参考结点, 根据基尔霍夫电流定律, 由结点 1 和 2 的电流关系, 得出电路的电流电压关系为

$$\frac{V_{1+}(s)}{Z_0} + sCV_c(s) - Cv_c(0_-) + I_{A1} - \frac{V_S(s) - V_{1+}(s)}{R_S} = 0, \quad (1)$$

$$sCV_c(s) - Cv_c(0_-) + I_{A1} - \frac{V_{2+}(s)}{R_L} - \frac{V_{2+}(s)}{Z_0} = 0, \quad (2)$$

其中  $V_{1+}$  和  $V_{2+}$  分别为两条传输线上沿  $+\hat{z}$  方向传播的正向电压波,  $I_{1+}$  和  $I_{2+}$  分别为对应的电流. 因为电路从 0 时刻开始工作, 所以电容此时的电压  $v_c(0_-) = 0$ . 为了与传输线的阻抗相匹配, 取  $R_S$  和  $R_L$  的值等于传输线的等效阻抗, 即

$$R_s = R_L = Z_0 = R = 50 \Omega, \quad (3)$$

将(3)式代入(1)和(2)式,解得  $V_{1+}$ ,  $V_{2+}$ , 由图2中电压关系可得,输出的信号电压(即  $R_L$  上的电压)和 APD 两极间的电压(即结电容电压  $V_C$ )分别为

$$V_{R_L} = V_{2+}(z=0, s) = \frac{sRC}{4(sRC+1)}V_s + \frac{I_{A1}R}{2(sRC+1)}, \quad (4)$$

$$V_C = V_{1+} - V_{2+} = \frac{V_s}{2(sRC+1)} - \frac{I_{A1}R}{sRC+1}, \quad (5)$$

当两路信号分别到达两根传输线的终端时,对于终端开路的传输线,  $z=l$  处的边界条件为<sup>[14]</sup>  $V_- = V_+$ , 其中  $V_-$  为传输线上沿着  $-\hat{z}$  方向传播的电压波. 对于终端短路的传输线,  $z=l$  处的边界条件为<sup>[14]</sup>  $V_- = -V_+$ .

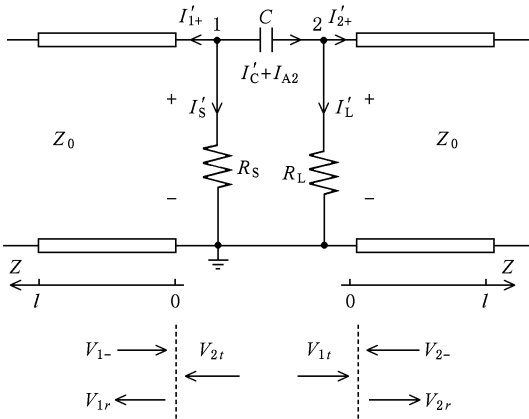


图3 过程二的等效电路图

2) 如图3所示,在  $t=2T_0$  时刻,当沿着  $-\hat{z}$  方向传播的两列信号  $V_{1-}$  和  $V_{2-}$  到达  $z=0$  处时,将内阻为零的理想信号源看作短路到地,两列信号脉冲  $V_{1-}$  和  $V_{2-}$  在  $z=0$  处将分别形成一个反射波  $V_{1r}$ ,  $V_{2r}$  和一个传输波  $V_{1t}$ ,  $V_{2t}$ . 设 APD 的结电容  $C=1$  pF, 结电容的时间常数  $\tau=RC=50$  ps, 而电缆的延迟时间  $T_0 > 10$  ns<sup>[5]</sup>, 认为电容此时已经放电结束,即  $v_c(2T_{0-})=0$ . 假设此时 APD 探测到第二个单光子信号, APD 产生的雪崩电流为  $I_{A2}(s)$ .

$2T_0 \leq t < 4T_0$ , 在  $z=0$  处,沿着  $-\hat{z}$  方向传播的信号  $V_{1-}$  和  $V_{2-}$  分别为

$$V_{1-}(z=0, s) = \left[ \frac{sRC+2}{4(sRC+1)}V_s - \frac{I_{A1}R}{2(sRC+1)} \right] k^2 e^{-s2T_0}, \quad (6)$$

$$V_{2-}(z=0, s)$$

$$= - \left[ \frac{sRC}{4(sRC+1)}V_s + \frac{I_{A1}R}{2(sRC+1)} \right] k^2 e^{-s2T_0}, \quad (7)$$

式中,  $k$  表示传输线对信号的衰减程度, 系数  $e^{-s2T_0}$  表示信号在时域延迟  $2T_0$  时间.

同过程1), 如图3所示, 对于结点1, 2, 由基尔霍夫电流定律得

$$\frac{V_{1r}(s) + V_{2r}(s) - V_{1-}(s)}{Z_0} + \frac{V_{1r}(s) + V_{2r}(s) + V_{1-}(s)}{R_s} + sCV'_c(s) + I_{A2} = 0, \quad (8)$$

$$sCV'_c(s) + I_{A2} - \frac{V_{2r}(s) + V_{1r}(s) + V_{2-}(s)}{R_L} - \frac{V_{2r}(s) + V_{1r}(s) - V_{2-}(s)}{Z_0} = 0, \quad (9)$$

$V_{1r}$  和  $V_{2r}$  的传播方向均沿着  $+\hat{z}$  方向, 不妨设这两列波的叠加后的合电压波为  $V'_{1+}$ , 同理, 沿  $+\hat{z}$  方向传播的两列波叠加后的合电压波为  $V'_{2+}$ , 即

$$V'_{1+}(s) = V_{1r} + V_{2r}, \quad V'_{2+}(s) = V_{2r} + V_{1r}, \quad (10)$$

将(10)式代入(8), (9)式, 解得  $V'_{1+}$ ,  $V'_{2+}$ , 由图3中的电压关系得负载  $R_L$  的电压

$$V_{R_L}(z=0, s) = V_{2-}(z=0) + V'_{2+}(z=0) = \frac{I_{A2}R - I_{A1}Rk^2}{2(sRC+1)} e^{-s2T_0}, \quad (11)$$

同时得到 APD 两端的电压为

$$V'_c(s) = V_{1-} + V'_{1+} - V_{2-} - V'_{2+} = \left[ \frac{V_s k^2}{2(sRC+1)} - \frac{I_{A2}R}{sRC+1} \right] e^{-s2T_0}. \quad (12)$$

经过  $T_0$  时间, 两列沿  $+\hat{z}$  方向传播的信号到达  $z=l$  处, 与过程一相同, 在终端开路电缆中传输的信号会被同向反射回来, 而在终端短路电缆中传输的信号则会被反向反射回来.

3) 如图4所示, 在  $t \geq 4T_0$ ,  $z=0$  处沿  $-\hat{z}$  方向传播的两个信号  $V'_{1-}$  和  $V'_{2-}$  为

$$V'_{1-}(z=0, s) = - \left[ \frac{sRC}{4(sRC+1)}V_s k^2 + \frac{I_{A2}R}{2(sRC+1)} \right] k^2 e^{-s4T_0}, \quad (13)$$

$$V'_{2-}(z=0, s) = - \left[ \frac{sRC}{4(sRC+1)}V_s k^2 + \frac{I_{A2}R}{2(sRC+1)} \right] k^2 e^{-s4T_0}. \quad (14)$$

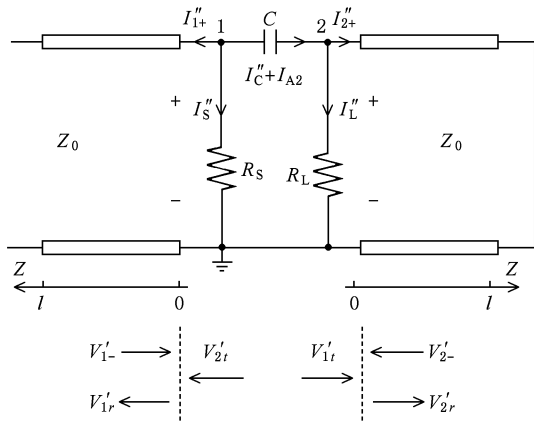


图4 过程三的等效电路图

在  $t \geq 4T_0$ , 两列波  $V_{1-}'$  和  $V_{2-}'$  到达  $z=0$  处的负载, 同样在负载处分别形成一个反射波  $V_{1r}'$ ,  $V_{2r}'$  和一个传输波  $V_{1t}'$ ,  $V_{2t}'$ . 而电容  $C$  此刻的初始电压  $v_C(4T_0) = 0$ . 各电流和电压的参考方向如图4所示, 由各支路的电流电压关系和基尔霍夫电流定律, 得结点1和2的电流电压关系为

$$\frac{V_{1r}'(s) + V_{2r}'(s) - V_{1-}'(s)}{Z_0} + \frac{V_{1r}'(s) + V_{2t}'(s) + V_{1-}'(s)}{R_s} + sCV_C''(s) = 0, \quad (15)$$

$$sCV_C''(s) - \frac{V_{2r}'(s) + V_{1t}'(s) + V_{2-}'(s)}{R_L} - \frac{V_{2r}'(s) + V_{1t}'(s) - V_{2-}'(s)}{Z_0} = 0. \quad (16)$$

与过程2)相同, 仍然可以设

$$\begin{aligned} V_{1+}''(s) &= V_{1r}' + V_{2t}', \\ V_{2+}''(s) &= V_{2r}' + V_{1t}', \end{aligned} \quad (17)$$

将(17)式代入(15), (16)式, 解得在  $z=0$  处,

$$V_{1+}''(z=0, s) = V_{2+}''(z=0, s) = 0, \quad (18)$$

由(18)式可得到负载阻抗  $R_L$  的电压为

$$\begin{aligned} V_{R_L}''(s) &= V_{2+}'' + V_{2-}' \\ &= - \left[ \frac{sRC}{4(sRC + 1)} V_S k^2 + \frac{I_{A2} R}{2(sRC + 1)} \right] \\ &\quad \times k^2 e^{-s4T_0}. \end{aligned} \quad (19)$$

由(13)式, (14)式和(18)式得, 得到APD两端电压为

$$V_C''(s) = V_{1-}' + V_{1+}'' - V_{2-}' - V_{2+}'' = 0. \quad (20)$$

由以上分析可知, 在一个探测周期内, 会有两个门控脉冲加载到APD的阴极, 这两个门控脉冲都可以用来探测单光子信号. 在过程二中, 当消除了

电尖峰噪声对探测信号的影响, 才能提取出纯净的雪崩信号, 提高探测效率. 因此使用该系统进行单光子探测就分别有采用第一个门控脉冲<sup>[5]</sup>和采用的是第二个门控脉冲<sup>[3]</sup>两种不同的方案.

若采用第一种方案, APD在第一个门控脉冲时发生雪崩, 即  $I_{A1} \neq 0, I_{A2} = 0$ , 经过电缆反射后, 在过程二中可以探测到雪崩信号, 将(11)式作拉普拉斯逆变换, 得到

$$\begin{aligned} v_{R_{L1}}(t) &= - \frac{k^2}{C} e^{-\frac{t-2T_0}{RC}} * i_{A1}(t-2T_0) \\ &\quad \times \varepsilon(t-2T_0), \end{aligned} \quad (21)$$

式中, “\*”表示卷积,  $\varepsilon(t)$ 是单位阶跃函数. 由(21)式可以看出, 电尖峰噪声被消除, 探测到的雪崩信号脉冲电压为负值. 输出的信号以  $\tau = RC$  衰减, 幅度与  $C$  成反比, 所以要获得更高的信号输出, 需要选用结电容较小的APD.

若采用第二种方案, APD在第二个门控脉冲时发生雪崩, 即  $I_{A1} = 0, I_{A2} \neq 0$ , 此时直接提取雪崩信号, 通过拉普拉斯逆变换, 由(11)式得到探测到的雪崩信号为

$$\begin{aligned} v_{R_{L2}}(t) &= \frac{1}{C} e^{-\frac{t-2T_0}{RC}} * i_{A2}(t-2T_0) \\ &\quad \times \varepsilon(t-2T_0), \end{aligned} \quad (22)$$

可得, 电尖峰噪声同样被消除, 此时探测到的雪崩信号脉冲电压为正值.

### 2.3. 实验结果与讨论

在实验中, 为了说明电尖峰的消除效果与电缆的损耗、色散等非理想特性无关, 使电缆的衰减效果更加显著, 我们选用电缆的长度为4.15 m, 延迟时间约为24.875 ns. 实验测得脉冲信号在电缆上传输一个来回幅度衰减到原来的42.2%, 因此可得电缆的衰减系数  $k = 0.76$ , 电容值为5 pF, 门控脉冲宽度2 ns, 信号的幅值为6 V. 我们通过 Lecray 的1 GHz带宽的示波器来观察输出的波形.

#### 2.3.1. 电尖峰噪声的消除效果

图5的第一条曲线为单独使用终端开路电缆的实验结果, 第二条曲线是单独使用终端短路电缆的实验结果. 图中第一个脉冲是输入的门控脉冲产生的电尖峰, 第二个脉冲是分别经过开路和短路电缆反射回来的电尖峰.

由(11)式得, 若一个探测周期中APD没有发生雪崩, 即  $I_{A1} = I_{A2} = 0$ , 过程2)中  $R_L$  的电压  $V_{R_L} = 0$ . 如图6所示, 在过程2)输出的信号中, 电尖峰的幅



图 5 两根电缆中传输的尖峰噪声

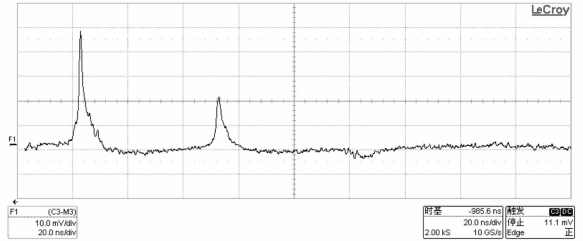


图 7 结电容两端电压

度已经接近于系统的噪声,因此可以认为尖峰噪声已经被消除.实验中测得尖峰噪声消除前和消除后的幅度分别为 27 mV 和 1.5 mV,由此可得噪声抑制比为 25.1 dB.图 5 中可以看出,经过两根电缆反射的尖峰噪声幅度相同并且极性相反,两路噪声可以叠加相消.虽然信号幅度有所衰减,但是当两根电缆对信号的衰减相同时,噪声仍然可以消除.因此即使电缆是非理想的,两个脉冲信号仍然有很好的对称性,可以达到叠加相消的效果.

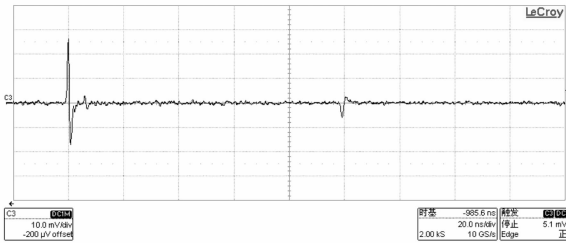


图 6 尖峰噪声的消除效果

### 2.3.2. APD 的偏置电压

对(5)式作拉普拉斯逆变换,可以得到第一个门控脉冲的表达式为

$$v_{p1}(t) = \frac{1}{2RC} e^{-\frac{t}{RC}} * v_s(t) \cdot \varepsilon(t), \quad (23)$$

由(12)式可以得到第二个门控脉冲的表达式为

$$v_{p2}(t) = \frac{k^2}{2RC} e^{-\frac{t-2T_0}{RC}} * v_s(t-2T_0) \times \varepsilon(t-2T_0), \quad (24)$$

从(23)和(24)式看出第二个门控脉冲的波形与第一个门控脉冲相同,但是在时间上滞后了  $2T_0$ ,幅度上减小到原来的  $k^2$  倍.实验中结电容两端电压如图 7 所示,从图中可以看出,在一个周期内,会有两个门控脉冲加载到电容两端,两个门控脉冲的形状相同.前后两个脉冲的时间间隔为  $2T_0 = 49.75$  ns,因为电缆的损耗导致第二个门控脉冲的幅度衰减到为第一门控脉冲幅度的 47.6%.

### 2.3.3. 最小探测周期

由(4)式和(19)式得,过程 1 和过程 3 输出的信号波形相同,极性相反.又根据式(18),在过程 3),反射电压波互相抵消,没有新的反射波在电缆中传播,不会对后续的探测造成影响.设门控脉冲的宽度为  $W$ ,电容经过  $5\tau$  后完全放电. $\tau$  为电容的时间常数,且  $\tau = RC$ .式中  $R$  为负载电阻, $C$  为 APD 的结电容.电缆的时间延迟为  $T_0$ .所以,系统的最小探测周期  $T$  为

$$T = 4T_0 + W + 5\tau, \quad (25)$$

如图 6 所示,第三个尖峰噪声之后不再有信号脉冲出现,因此测得一个探测周期时间约为 103 ns,电容时间常数为  $\tau = RC = 250$  ps,因此理论计算的探测周期为  $T = 4 \times 24.875 + 2 + 5 \times 0.25 = 102.75$  ns.由此可以看出实验结果和理论计算符合的很好.

## 2.4. 对单光子信号同步门脉冲选择的讨论

### 2.4.1. 不考虑后脉冲的情况

当电缆的延时比 APD 的被缺陷俘获的可再释放的载流子的平均寿命长的时候,可以忽略后脉冲的影响<sup>[15,16]</sup>.

#### 1) $k = 1$

若电缆对信号没有衰减,即  $k = 1$ ,考虑信号的时延,由(23)和(24)式可知,  $v_{p1}(t) = v_{p2}(t + 2T_0)$ ,说明两种方案的偏置电压幅度相同,APD 具有相同的倍增因子; $k = 1$ ,比较(21)式和(22)式可知,使用第一个门控脉冲探测的单光子信号  $v_{R_{L,1}}(t)$  经过电缆传输后,信号的幅度不会发生衰减.因此使用两个门控脉冲探测单光子信号的效果是相同的.

#### 2) $k < 1$

当考虑电缆损耗的时候,使用第一个门控脉冲探测的单光子信号  $v_{R_{L,1}}(t)$  经过电缆传输后,因为损耗会导致信号的幅度衰减到原来的  $k^2$  倍.因为  $k < 1$ ,由(23)式和(24)式可知,

$$v_{p1}(t) = k^2 v_{p2}(t + 2T_0), \quad (26)$$

根据(26)式,第一种方案的门控脉冲的幅度高于第二种方案,而偏置电压是影响 APD 的探测性能的最主要的因素,因为随着门控脉冲幅度的增加,雪崩信号平均幅度是接近于指数增长的<sup>[17]</sup>,同时单光子信号触发雪崩的概率也增加了<sup>[7]</sup>. 虽然信号  $v_{R1}(t)$  经过电缆的传输后会衰减为原来的  $k^2$  倍,但是,因为  $k < 1$ ,门控脉冲的高幅度导致的  $v_{R1}(t)$  的增长远大于其衰减量,所以,在脉冲信号发生器输出脉冲幅度相同的情况下,第一种方案的输出信号  $v_{R1}(t)$  的幅度仍然大于  $v_{R2}(t)$ ,可以得到更高的探测效率. 虽然提高脉冲发生器的输出脉冲幅度,可以提高第二种方案的门控脉冲幅度,但是也会导致这种方案的第一个脉冲的幅度过高,即使没有光子到达,也会导致暗击穿的概率的急剧增大,根据(11)式,暗击穿电流与雪崩信号电流方向相反,导致探测效率降低. 并且,当电缆的损耗比较大的时候,第一个门脉冲的幅度会比第二个门脉冲的幅度高很多,可能损坏 APD.

综上所述,当不考虑后脉冲的情况时,应该采用第一种方案.

#### 2.4.2. 后脉冲率不能被忽略的情况

当电缆的延时比 APD 的被缺陷俘获的可再释放的载流子的平均寿命短的时候,就必须考虑后脉冲的影响. 在第一种方案中,当 APD 在第一个门控脉冲时发生雪崩,考虑到 APD 的后脉冲的影响,在第二个门控脉冲时,APD 可能因为被缺陷俘获的载流子的再释放而触发雪崩,由(11)式可知,后脉冲

产生的脉冲信号和经过电缆反射回来后的雪崩脉冲信号极性相反,导致信号叠加相消,降低了雪崩信号的幅度,从而降低了探测的效率. 而第二种方案,采用第二个门控脉冲来探测单光子信号,受后脉冲问题的影响很小.

综上所述,当考虑后脉冲的情况时,应该采用第二种方案,此时,必须保证电缆的损耗足够小,以防止在第一个门脉冲期间发生的暗击穿导致的雪崩.

### 3. 结 论

通过分析可以看出,同轴电缆反射消除电尖峰的方案采用比较简单的噪声抑制电路,可以达到很好的消除电尖峰噪声的效果. 而且与 APD 和门控脉冲的特性无关,具有广泛的适用性. 在整个探测周期中,APD 两次被偏置于雪崩击穿电压之上. 对于 APD 探测单光子信号时机的选取,要综合考虑到偏置电压对 APD 的影响,后脉冲率,暗击穿率和实际电缆对 APD 雪崩信号的衰减. 在保证准确提取雪崩信号和不损坏 APD 的前提下,减少暗计数和后脉冲对探测效率的影响. 本文通过对输出信号的分析,给出了输出雪崩信号的表达式,从而得到消除电尖峰噪声的条件. 通过对 APD 的偏置电压的分析,给出了单光子信号与门控脉冲的同步方案的选择条件. 最后给出了这一方案的最小探测周期. 本文的分析结果,将有助于红外单光子探测器的研究、设计和优化工作.

[1] Jiao R Z, Feng C X, Ma H Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1352 (in Chinese) [焦荣珍、冯晨旭、马海强 2008 物理学报 **57** 1352]

[2] Wang J D, Wu Z H, Zhang B, Wei Z J, Liao C J, Liu S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5620 (in Chinese) [王金东、吴祖恒、张兵、魏正军、廖常俊、刘颂豪 2008 物理学报 **57** 5620]

[3] Liu Y 2007 *Ph. D. Dissertation* (Anhui: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [刘云 2007 博士学位论文(安徽:中国科学技术大学)]

[4] Torbjoern N 1999 *MS Thesis* (Trondheim: Norwegian University of Science and Technology)

[5] Bethune D S, Risk W P 2000 *IEEE J. Quantum Electron* **36** 340

[6] Tomita A, Nakamura K 2002 *Opt. Lett.* **27** 1827

[7] Bethune D S, Risk W P, Pabst G W 2004 *Journal of Modern Optics* **51** 1359

[8] Yoshizawa A, Kaji R, Tsuchida H 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3606

[9] Namekata N, Sasamori S, Inoue S 2006 *Optics Express* **14** 10043

[10] Yuan Z L, Kardynal B E, Sharpe A W, Sheilds A J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 041114

[11] Wei Z J, Li K Z, Zhou P, Wang J D, Liao C J, Guo J P, Liang Y S, Liu S H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4142

[12] Liu Y, Wu Q L, Han Z F, Dai Y M, Guo G C 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 252

[13] McIntyre R J 1972 *IEEE Transactions on Electron Devices* **19** 703

[14] Kong J A 2003 *Electromagnetic Wave Theory* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p113 (in Chinese) [孔金瓯 2003 电磁波理论(北京:电子工业出版社)第 113 页]

[15] Li S F, Xiong Y Y, Li R H, Liao C J 2007 *Acta Sinica Quantum Optica* **13** 141 (in Chinese) [李水峰、熊予莹、李日豪、廖常俊

2007 量子光学学报 **13** 141]

[17] Kai Zhao, Arthur Zhang, Yu-Hwa Lo, William Farr 2007 *Appl.*

[16] Yen H T, Lin S D, Tsai C M 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 054504

*Phy. Lett.* **91** 081107

## Analysis of single photon detector based on the reflection of coaxial cables<sup>\*</sup>

Cheng Nan Huang Gang-Feng Wang Jin-Dong Wei Zheng-Jun<sup>†</sup> Guo Jian-Ping 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 18 June 2009; revised manuscript received 1 December 2009)

### Abstract

In this paper are analyzed the characteristics of the single photon detector (SPD) with using coaxial cables as reflection lines to cancel transient spikes noises, particularly, the characteristics of variations in bias voltage of the avalanche photodiode (APD) and output signal. Based on the theoretical analyses, the principle of the timing relation between single photon pulses and the two gate pluses is discussed. Also, the condition and the effect of transient spikes cancellation are achieved. And the minimal detecting period is obtained. Finally, we conduct some experiments to verify our theory. In our experiment, the noise rejection ratio is 25.1dB. The results accord with our theory satisfactorily. Our results will be helpful in designing and optimizing single photon detectors.

**Keywords:** single photon detector, Avalanche Photodiode, transient spikes cancellation

**PACC:** 0762, 0367

<sup>\*</sup> Project supported by the Guangdong Key Technologies R and D Program of China (Grant No. 2007B010400009), the Key Projects in the Guangzhou Science and Technology Pillar Program of China (Grant No. 2008Z1-D501).

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