

基于单光子探测的门控噪声抑制 电路研究与设计

马源, 王鹤, 高欣, 王栋, 孙迎萍

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 为减小单光子探测过程中受到的背景噪声影响, 采用门控淬灭电路淬灭雪崩信号; 高频门控信号在采样电阻上产生的微分噪声与微弱的雪崩信号混叠在一起, 不利于进行后续的探测、计数等操作, 因此从混叠的信号中提取出微弱的雪崩信号至关重要; 通过分析门控淬灭电路采样电阻上微分噪声的产生原因, 文章采用电容平衡差分电路与带阻滤波电路相结合的方法, 设计 500 MHz 的高频正弦门控淬灭电路及其后续的滤波、放大及整形电路, 从混叠信号中提取出雪崩信号并输出 5 V 数字电平信号, 解决了电容平衡差分电路存在的频率上限问题, 降低了雪崩信号处理电路设计的难度, 使门控信号的频率在阻带围内连续可调, 提高了电路整体的稳定性; 仿真结果表明, 门控信号的抑制比最高可达 88 dB, 解决了雪崩信号与微分噪声的混叠问题。

关键词: APD; 淬灭电路; 电容平衡; 滤波电路; 微分噪声

Research and Design of Gated Noise Suppression Circuit Based on Single Photon Detection

MA Yuan, WANG Yi, GAO Xin, WANG Dong, SUN Yingping

(Technology On Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics,
Lanzhou 730000, China)

Abstract: To reduce the background noise affected during single photon detection, a gating quenched circuit is used to quench an avalanche signal. The differential noise generated by a high frequency gating signal is stacked with a weak avalanche signal, which is not conducive to subsequent detection, counting and other operations. Therefore, it is crucial to extract a weak avalanche signal from aliasing signals. By analyzing the reason of differential noises on the sampling resistance of the gating quenching circuit, this paper presents a method for combining the capacitor balance differential circuit and the resistance filter circuit, designs a sinusoidal gating quenching circuit with 500 MHz high frequency, including its subsequent filtering, amplification and shaping circuit, extracts an avalanche signal from the stacked signal and output a 5 V digital level signal, solves the frequency upper limit of the capacitor balance differential circuit, reduces the difficulty in the avalanche signal processing circuit design, continuously adjusts the frequency of the gating signal in the range of resistance, and improves the stability of the circuit. Simulation results show that the suppression ratio of the gated signal reaches a maximum of 88 dB, which solves the aliasing of avalanche signal and differential noise.

Keywords: avalanche photon diodes (APD); quenched circuit; capacitance balance; filter circuit; differential noise

0 引言

单光子探测的测量距离远, 对微弱信号的探测效果

好。雪崩光电二极管 (APD, avalanche photon diodes) 是一种通过内部雪崩增益进行单光子探测的光电探测器, 具有功耗低、增益高及易于集成等优点, 可用于测

收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2024-09-19。

基金项目: 甘肃省科技重大专项计划(23ZDGA013)。

作者简介: 马源(2000-), 女, 硕士研究生。

通讯作者: 王鹤(1974-), 男, 博士, 研究员。

引用格式: 马源, 王鹤, 高欣, 等. 基于单光子探测的门控噪声抑制电路研究与设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10): 183-190.

距、三维成像及障碍物探测等许多领域^[1-2]。当 APD 两端所加偏置电压高于其雪崩击穿电压时, APD 工作于盖革模式, 灵敏度较高。在发生雪崩效应时, APD 会产生很大的反向偏置电流, 长时间的连续大电流会使器件发热, 影响器件的寿命, 该电流需要快速释放, 电流的释放过程即淬灭。为保证 APD 正常工作, 需要采用淬灭电路将 APD 两端偏置电压降低至雪崩电压以下。淬灭过程完成后, APD 器件阳极会变为高电平, 器件无法对光子继续检测, 处于失能状态, 需要将 APD 工作偏压重新提升至大于雪崩击穿电压, 以进行下一次光子探测。

单光子探测的目标物体接收到回波光子的同时, 也会受到背景噪声等因素的影响。由于 APD 探测器的暗计数率相对较高, 往往需要使其工作在门控模式下, 只有在门控时间内, 探测器可以正常工作。采用门控方式能够降低探测器的功耗、暗计数率及后脉冲概率等, 有效抑制噪声, 提高 APD 的探测效率和使用寿命。

20 世纪 90 年代, 美国贝尔实验室的 Levine 等人^[3]利用门控电路, 成功提高了单光子计数率, 并减少了二次击穿的概率。2006 年, 日本大学的 Namekata 等人^[4]采用正弦信号作为门控信号, 将门控频率提高到 800 MHz, 并采用带阻滤波器抑制采样电阻上的微分噪声。2007 年, 剑桥大学的 Yuan 等人^[5]使用自差分技术, 利用同轴电缆反射法, 当检测效率为 10.8% 时, 后脉冲概率为 6.16%, 取得了良好的结果。但该方法需要使用两根完全相同的同轴电缆, 不便于调整门控信号频率。2010 年, 华东师范大学的陈修亮等人^[6]级联两个自差分电路, 在门控频率为 200 MHz 时, 信噪比提高 11 dB。该方法工作于较低的门控频率下, 比起单独的自差分电路, 提升效果有限。2018 年, 上海理工大学的黄梓楠等人^[7]结合可调电容平衡与低通滤波技术提取雪崩信号, 在门控信号为 700 MHz, 检测效率为 10% 时, 后脉冲概率为 3.7%, 但低通滤波器具有平滑效果, 可能会将多个雪崩噪声平滑为一个, 影响工作频率范围^[8]。2023 年, 中科院半导体研究所的杨旭等人^[9]设计了被动淬灭与门控功能相结合的 APD 像素电路, 通过三态门将雪崩信号输出至外部电路。

由于 APD 探测器结电容的存在, 探测器具有容性特性, 门脉冲信号通常会因结电容充放电而在采样电阻上产生噪声, 与微弱的雪崩信号混叠在一起。将雪崩信号从噪声中提取出来是提高 APD 探测效率的关键。本文利用可调电容差分电路并结合带阻滤波电路的方式处理微分噪声, 减小后续雪崩信号处理电路设计的复杂程度, 使得门控信号在一定频率范围内连续可调。在 APD 等效电路模型的基础上进行电路的仿真设计, 从

雪崩信号与微分噪声的混叠信号中提取出微弱的雪崩信号, 并进行放大, 滤波, 整形等操作, 带阻滤波电路的门控信号抑制比最高达到 88 dB, 最终输出为数字电平信号。通过分析电路的仿真结果, 初步验证了设计的合理性和正确性。

1 APD 淬灭方式及等效电路模型

1.1 APD 淬灭方式

APD 是单光子探测中的关键器件, 体积小, 质量小, 灵敏度高, 是基于光电效应与雪崩倍增效应的光电探测器件。根据 APD 两端所加反向偏压的不同, APD 的工作模式可分为线性模式与盖革模式两种。

在外部偏置电压增加时, 有一个临界状态使 APD 恰好处于雪崩倍增状态, 此时的电压即 APD 的雪崩电压, 即击穿电压。外部偏置电压小于雪崩电压时, APD 为线性模式, 倍增效果有限。当外部偏置电压大于雪崩电压时, APD 为盖革模式, 输出的响应电流随着偏置电压的增加急剧增大。APD 的电流增益 M 可表示为雪崩光电流 I_M 与无光子入射时电流 I_P 的比值, M 与工作电压 V 的关系为:

$$M = \frac{I_M}{I_P} = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_B}\right)^n} \quad (1)$$

其中: V_B 为探测器的反向击穿电压, 参数 n 通常取值 1.5~4, 与 PN 结低掺杂区断面, 入射光波长等因素, 即探测器的结构与种类有关^[10], 为雪崩击穿电压。从理论上讲, 随着 APD 工作电压 V 的增加, 增益 M 也随之增加。在实际应用中, 虽然提高过偏压可以提高探测器的增益值, 但是增益值并不能无限增大, 随着增益增加, 探测器的暗电流值也会随之增加。因此需要为 APD 器件选择合适的工作电压。APD 的淬灭/复位电路主要有 3 种: 被动淬灭 (PQC, passive quenching circuit), 主动淬灭 (AQC, active quenching circuit), 门控淬灭 (GQC, gated quenching circuit)。

被动淬灭电路主要由大阻值电阻 R_1 构成。雪崩发生时, 大电流会快速释放在大电阻上, APD 的反向偏压降低, 退出雪崩状态。而随时间变化, 雪崩电流开始逐渐减小, 此时大电阻的分压也随之下降, APD 反向偏压升高, 重新进入盖革模式。电路虽然结构简单, 不会产生逻辑错误或失能等问题, 但是时间较长, 通常达到 1 μ s 以上, 在该时间内, APD 不能进行光子探测。被动探测效率较低。

主动淬灭电路加入了环路正反馈, 延迟单元等结构。光子到达前, APD 工作于盖革模式, 阳极处于低电平状态。光子到达后, 发生了雪崩效应, 产生雪崩电流, 阳极电位提高, 经过反相器到达 M2 的栅极, M2

导通后将阳极电位拉到 VEE, 大电流被淬灭。输出信号经过正反馈环路, 通过 M1 将阳极电位重新拉至低电位, 结束复位过程。主动淬灭的主要思路是加入正反馈调节环路控制 APD 两端电压, 从而进行电路的淬灭时间与恢复时间的控制。比起被动电路, 主动淬灭电路虽然能明显缩短死时间, 可达到 10 ns 以下^[11], 但电路整体较为复杂, 电路面积大, 环境光噪声, 暗计数率都不能得到有效抑制。

门控淬灭利用外部输入的门控信号 ON 和 OFF, 形成一个窗, 窗信号 ON 开启时, 器件处于盖革模式, 可以进行光子探测。窗关闭时, APD 的阳极达到高电位, 处于高阻状态^[12], 不能发生雪崩击穿。

对于远距离高速单光子探测的应用, 需要尽量缩短淬灭时间, 降低后脉冲概率和暗计数率, 所以选择门控淬灭的方式。在特定周期内定时开启窗, 可以有效规避环境噪声, 提高了 APD 的信噪比, 器件的响应速度更快, 探测效率更高, 能够更加有效地发挥 APD 器件的性能。因此研究淬灭电路并提取雪崩信号对于提高单光子探测的效率具有重要意义。

1.2 APD 的等效电路模型

APD 的建模方式主要有 verilog-A 建模法和等效电路建模法两种^[13-14], 本文重点关注盖革模式下 APD 的性质, 可以省略线性模式, 采用等效电路法。通过建立 APD 等效电路模型, 准确体现出 APD 器件的 I-V 特性^[15], 模拟雪崩效应的触发, 保持与淬灭功能, 进行 APD 淬灭电路的仿真设计与验证。

本文在 APD 探测器等效电路模型的基础上^[16]进行淬灭电路的设计和仿真, 如图 1 所示, 将 APD 等效为开关与电压源的串联模型, V 是一个等效于 APD 击穿电压的电压源, C_d 为结电容, C_p 为寄生电容, 二者均为皮法级别的电容。 R_d 为空间电荷电阻之和, R_b 为等效电阻, 由 APD 的反向漏电流引起, 由于该电流值很小, 可忽略不计, 因此可将 R_b 的阻值视作无穷大。

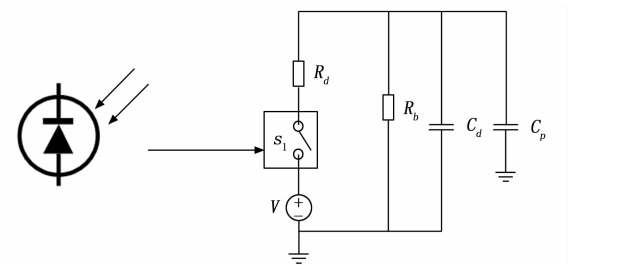


图 1 APD 等效电路模型

2 电容平衡带阻滤波电路的设计

2.1 门控噪声的来源分析

对于许多暗计数率较高, 死时间较长的 APD 探测

器, 通常要使其工作在门控模式下, 要求探测器的工作偏压能够在门控脉冲有效时到达击穿电压, 在门控关闭后迅速降到雪崩击穿电压之下。由于只有在门开启时才能进行光子探测, 因此可以有效降低 APD 探测器功耗, 延长使用寿命, 降低暗计数率, 有效发挥 APD 探测器的性能。

由于 APD 探测器结电容 C_d 的存在, 探测器具有容性特性, 而雪崩信号非常微弱, 门脉冲信号通常会因充放电而在采样电阻上产生噪声, 与微弱的雪崩信号混叠在一起。将雪崩信号从噪声中提取出来是提高 APD 探测器效率的关键。门控信号可分为方波和正弦波两种, 方波门控信号经过探测器结电容产生尖峰脉冲噪声, 正弦门控信号经过探测器结电容产生正弦微分噪声, 如图 2 所示。

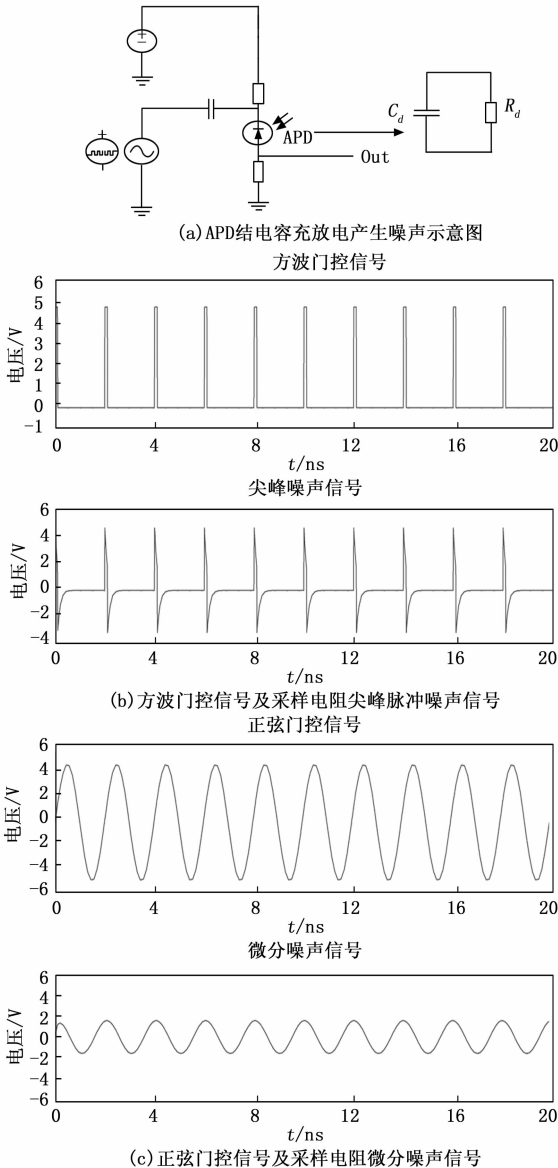


图 2 正弦微分噪声及采样电阻尖峰脉冲噪声产生原因仿真图

比起方波门控信号, 正弦门控信号频率成分较为单一^[17], 其在采样电阻上产生的微分噪声大小主要受到正弦信号频率的影响, 频率越高, 微分噪声信号的幅值越大。由于雪崩过程发生的时间非常短, 通常为纳秒或亚纳秒级别, 在仿真过程中, 用窄脉冲信号模拟光子脉冲入射, 脉冲宽度设置为 100 ps, 频率为 10 MHz。正弦门控信号的频率为 500 MHz, 峰峰值为 5 V, 利用高频正弦波进行门控淬灭。

微分信号的幅值 U 可看作采样电阻 R_s 的分压值:

$$U \approx \frac{R_s}{R_s + \frac{1}{2\pi fC}} U_{\text{gate}} \quad (2)$$

其中: U_{gate} 为门控电压值, f 为门控电压频率, C 为 APD 器件结电容值。采样电阻上的微分噪声峰值的仿真结果为 1.5 V, 如图 3 所示, 可以看出微分噪声的幅值过大, 同时雪崩信号十分微弱, 淹没在微分噪声中, 需要对微分噪声进行进一步处理。

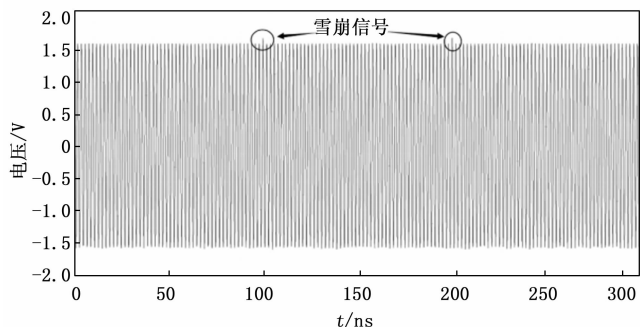


图 3 没有进行差分处理时, 采样电阻两端微分噪声仿真结果

通常微分噪声只含有其基频和谐波成分, 主要分布在高频部分, 而雪崩信号主要分布于低频部分, 因此可采用低通滤波器或带阻滤波器滤除特定频率的微分噪

声, 得到相对完整的雪崩信号。

本文设计的 500 MHz 高频正弦门控淬灭电容平衡带阻滤波电路工作原理如图 4 所示, 信号发生器发出两路信号, 一路经过放大器与带通滤波器后产生高频正弦信号, 另一路通过移相器将该正弦信号移相 180° , 两路反相的正弦信号分别经过 APD 门控淬灭电路和电容平衡差分电路, 在采样电阻上输出差分后的淬灭信号。差分后的淬灭信号经过放大、滤波及整形等一系列处理后, 最终输出为数字电平信号。在后续的实际应用过程中, 可通过软件或单片机对数字电平的个数进行计数, 从而计算得到 APD 的暗计数率, 后脉冲概率等参数。

2.2 电容平衡差分电路设计

电容平衡技术由双 APD 平衡互差分的方法改进而来。选择两个半导体特性相似的 APD, 一个进行正常的光子探测, 另一个遮光, 只进行暗计数。两个 APD 的电容响应特性相似, 输出信号分别连接到魔 T 网络 (MTNT, magic T network) 的 0 与 π 输入端。用差分器抵消它们的电容响应, 只保留雪崩信号。但是在探测过程中, 平衡支路的 APD 发生暗计数雪崩过程时, 可能会将雪崩信号也一起抵消。该电路具有对称性, 适用于门控频率可调的门控淬灭电路。在此基础上, 采用可调电容对该平衡支路进行改进, 用一个可调电容代替遮光的 APD, 调整可调电容值使其在采样电阻上产生幅值大小相同的微分噪声。

2.3 放大电路设计

由于放大电路模块直接与 APD 探测器的平衡差分电路连接, 对输出的雪崩电流信号进行放大并将其转换为电压信号。该部分电路作为前置放大器部分, 其放大性能会对整个电路产生重要影响。因此在放大电路的设计中, 需要重点考虑所采用的放大器的增益带宽积

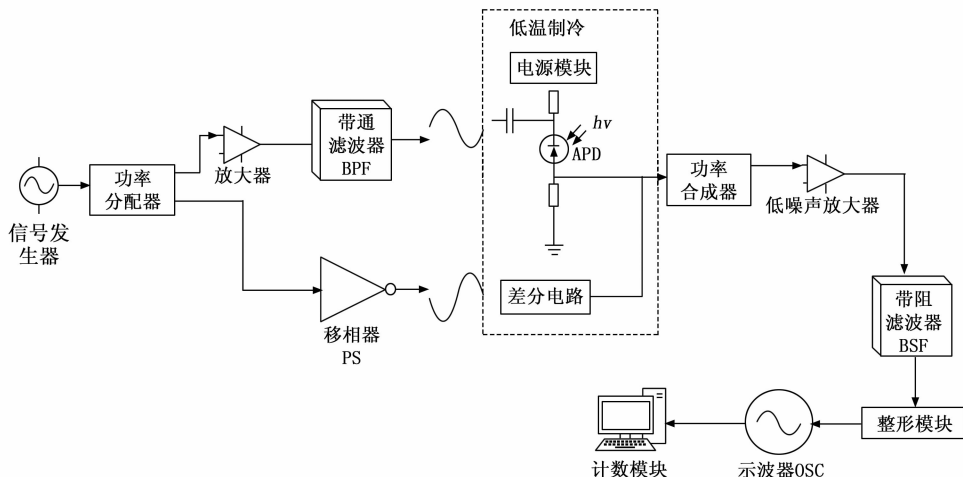


图 4 电容平衡带阻滤波电路工作原理框图

(GBP) 和信噪比等参数。

通常考虑通过电阻进行电流到电压的转换, 常用的放大电路有以下 3 种, 分别为: 低阻抗放大电路、高阻抗放大电路及跨阻放大电路。其中, 低阻抗放大电路与高阻抗放大电路的结构, 二者结构相似, 都是通过相对地的电阻分压实现电流到电压的转换, 区别在于二者的电阻值不同。较高或较低的电阻值都会影响电路的响应程度和灵敏度。因此选用跨阻放大电路对探测器输出的微弱光电流进行进一步放大, 并输出为电压信号。该电路的核心部分是跨阻放大器 (TIA, trans-impedance amplifier), 由于 TIA 动态范围较大且输出稳定, 适用于微弱光电流放大和检测等应用场景。

通过对不同多种跨阻放大器进行参数分析, 采用低噪声放大器对差分电路输出的雪崩信号进行放大, 第一级放大器采用 TI 公司的 OPA847 芯片, 该芯片增益带宽积为 3.9 GHz, 输入电压噪声为 $0.85 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 适用于跨阻放大^[18]等应用。

由于第一级放大器的电压放大幅度仍旧较小, 不便进行后续的时刻鉴别操作, 需要采用第二级放大器对输出的电压进行进一步放大。第二级放大器采用 TI 公司的 OPA695 芯片, 该芯片是一款电流反馈的运算放大器, 压摆率为 $4\,300 \text{ V}/\mu\text{s}$, 带宽高达 1.7 GHz, 功耗低, 抗干扰能力强, 适用于电压放大等应用。

2.4 带阻滤波电路设计

理论上采用可调电容平衡方案可保证在整个频率范围内都具有较为良好的门控噪声抑制效果, 但在高频门控驱动下, 电容产生的尖峰噪声容易造成畸变和失真, 难以模拟出与微分噪声完全互补的噪声信号, 可调电容平衡方案通常用于门控频率为 200 MHz 之下的淬灭电路^[19]。同时, 在实际应用中, 电容平衡差分电路可能不会完全抵消微分噪声, 为保证电路能明确区分出雪崩信号, 降低后脉冲概率, 在一定的频率范围内具有良好的门控噪声抑制效果, 需要采用滤波器进一步滤除高频正弦门控产生的微分噪声。

由于雪崩信号幅值很小, 因此有源滤波器的使用可能会导致噪声引入, 不易提取雪崩信号, 相比之下, 无源滤波器结构较为简单^[20], 由电感、电容及电阻等无源器件组成, 引入噪声更小。综合考虑后选择无源滤波器进行放大电路后的滤波, 以减小非理想状态下被放大的门控噪声信号对电路造成的影响。按照滤波器的特性, 又可以将其分为: 巴特沃斯滤波器, 切比雪夫滤波器, 贝塞尔滤波器, 椭圆滤波器等。本小节设计了阻带宽度为 190 MHz, 中心频率为 500 MHz, 等效阻抗为 50Ω 的 5 阶巴特沃斯无源带阻滤波器 (BRF), 该滤波器模型由电感器件和电容器件组成。

在设计带阻滤波器之前, 可以设计阻抗特性、带宽和类型等参数都与带阻滤波器相似的高通滤波器 (HPF), 即首先设计一个截止频率为 190 MHz, 等效阻抗为 50Ω 的高通滤波器。而高通滤波器可通过基础的归一化低通滤波器 (LPF) 进行设计。也可以直接进行低通滤波器到带阻滤波器的转换, 低通滤波器中的电容由电感与电容的串联代替, 低通滤波器中的电感由电感与电容的并联代替^[21], 通过阻带中心频率可将二者进行转换。其中, ω_L 为下通带截止频率, ω_U 为上通带截止频率。B 为阻带带宽, ω_0 为阻带中心频率。

$$B = \omega_U - \omega_L \quad (3)$$

$$\omega_0^2 = \omega_U \cdot \omega_L \quad (4)$$

2.5 整形电路设计

探测器接收到回波脉冲信号时, 需要及时产生停止计时的信号, 使后端计时系统结束计时。该部分电路将模拟信号转化为数字信号, 同时需要滤除噪声, 散射等因素造成的影响。整形电路的作用是将模拟信号转化为数字脉冲信号并进行时刻鉴别, 主要可分为以下 3 种: 前沿时刻鉴别电路 (LED, leading edge discriminator)、高通容阻鉴别电路 (CR-High Pass Discriminator) 和恒比定时鉴别电路 (CFD, constant fraction discriminator)^[10]。

前沿时刻鉴别法通过设置阈值电平来实现鉴别, 将输入的信号与设定的阈值进行比较, 当回波脉冲信号的上升沿大于阈值电平时, 输出为数字信号, 此时刻即起始或结束时刻。回波脉冲信号如果受到大气衰减, 漫反射等因素的影响, 会产生距离行走误差, 发生幅度和时间游走的情况, 导致激光脉冲回波的上升沿到达时刻延迟或滞后。

恒比定时鉴别法可同时鉴别输入信号的上升沿与下降沿, 提高了鉴别的精度, 该方法的主要思想就是延迟时间与衰减系数的确定, 将输入信号进行延时后, 与原来的信号相比较, 如果衰减系数达到了设定的恒比后, 就可以鉴别信号的起止时间, 衰减系数通常取值在 0.2 ~ 0.5 之间^[10]。该方法适用于信号衰减较慢的情况, 比起前沿鉴别法, 该方法的时间分辨率较低。

高通容阻鉴别法基于电阻与电容进行时刻鉴别, 同样可以鉴别输入信号的上升沿与下降沿。由于压控放大电路的输出脉冲信号的幅度峰值也是极值点, 因此将该信号经过高通容阻滤波电路。该操作保留了信号的高频分量, 滤除了信号的低频分量, 将输入信号进行微分运算, 转变为双极性信号。该双极性信号的零点也是脉冲信号的极值点, 双极性信号的零点可用作脉冲鉴别时刻, 该方法受到零点附近信号斜率的影响较大。

在整形电路的设计过程中, 不仅需要选择合适的时

刻鉴别方法,还需要进行信号的脉宽缩窄,缩短信号的上升与下降时间。

虽然前沿鉴别法可能会被噪声影响,但是电路设计的难度较小,并且容易实现。为实现高度集成与小型化的目标,设计的信号处理电路不宜太过于复杂,由于前沿时刻鉴别法带来的误差影响不大,因此选择前沿时刻鉴别法来进行整形电路的设计。

采用 TI 公司的 TLV3501 芯片进行整形电路设计,该芯片作为一款迟滞比较器,可直接驱动 TTL 或 CMOS 逻辑,只需单电源供电,延迟时间仅为 4.5 ns,响应速度快,功耗低,适用于电路鉴别。在设计的过程中,需要根据实际情况为整形电路选择合适的阈值电平。

3 仿真实验结果与分析

本文设计的电容平衡淬灭电路仿真如图 5 所示,由于 APD 的击穿电压为 65 V,偏置电压需要略高于击穿电压。在仿真过程中将偏置电压设置为 68 V。采用可调电容 C_7 用于模拟微分噪声,通过差分电路的方式,不断调整可调电容的值,进一步减小采样电阻 R_3 上的微分噪声。将可调电容端的正弦门控信号进行反相或延时半个周期,使得在 APD 探测器与可调电容上产生两个幅值大小相等,相位相差 180° 的正弦信号,即 V_1 与 V_5 。两个反向的信号在采样电阻上进行差分,从而减小甚至抵消了微分噪声。经过差分后,输出仿真结果如图 6 所示,将其与图 3 的微分噪声仿真结果进行对比,可以看出,理想情况下,通过电容平衡差分电路的方式,雪崩信号被完整地分辨出来,而微分噪声信号的幅值很小,不足 1 mV,基本被抵消。

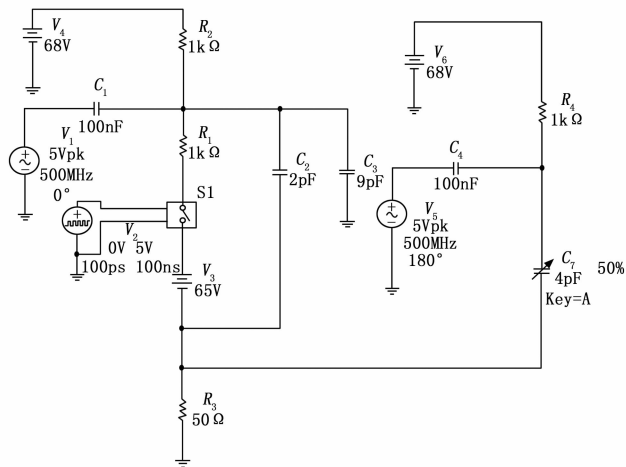


图 5 门控淬灭电容平衡电路仿真图

第一级放大电路的仿真情况如图 7 所示, R_9 为反馈电阻, 由于 OPA847 芯片需要外接直流电源工作, 因此采用滤波电容 C_8 滤除放大器 OPA847 外接的直流信

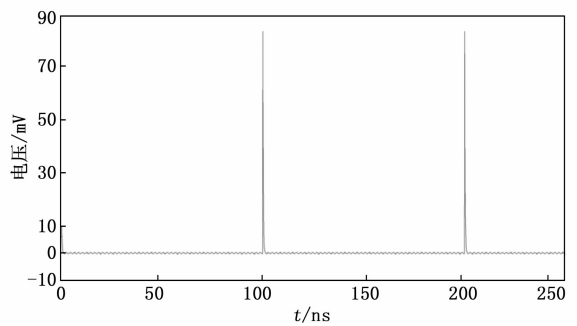


图 6 电容平衡差分电路输出的雪崩信号仿真图

号。为抑制共模电容,改善失真情况,采用反向放大的方式。输出电压仿真情况如图 8 所示,雪崩信号被放大到约 250 mV。

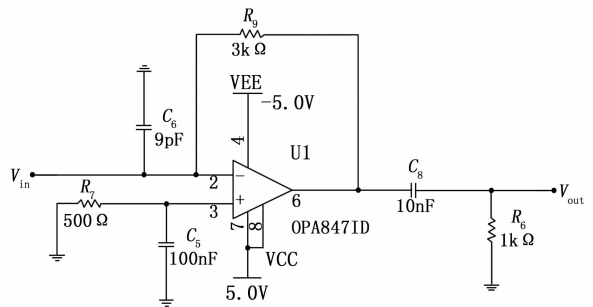


图 7 第一级放大电路仿真图

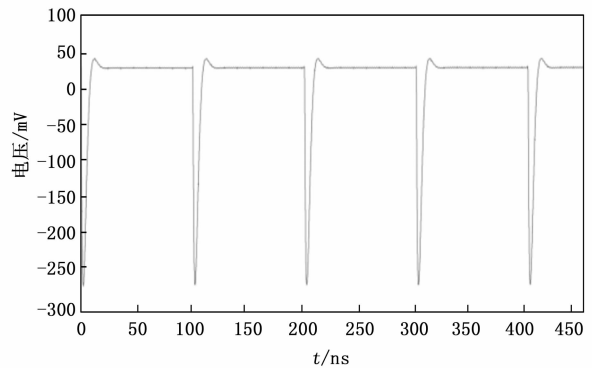


图 8 第一级放大器输出电压仿真结果

第二级放大电路仿真和输出电压仿真情况分别如图 9 和图 10 所示, 经过第二次放大后, 雪崩信号最大可达到 2.5 V, 被放大约 10 倍。根据式 (5), 该部分放大电路符合设计需求。

输出电压 V_{out} 与输入电压 V_{in} 的关系为:

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_{12}}{R_8} \right) \quad (5)$$

计算各个元器件的参数后, 5 阶巴特沃斯 LC 无源带阻滤波器的电路如图 11 所示。从图 11 (b) 的幅频特性可以看出, 频率为 500 MHz 时, 衰减为 88 dB, 具有良好的幅频特性。

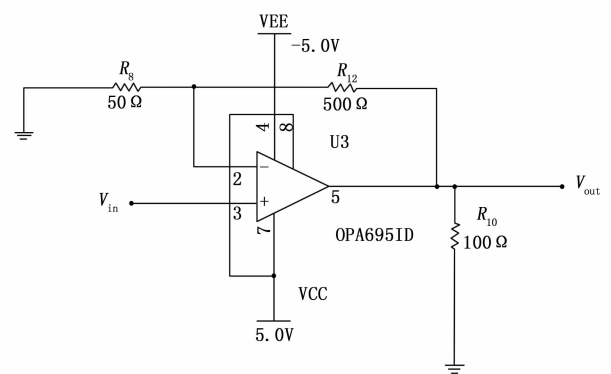


图 9 第二级放大电路仿真图

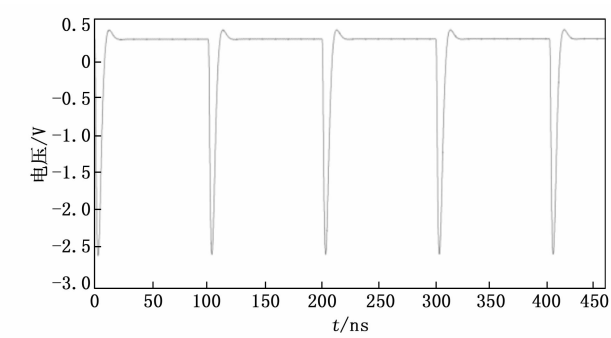
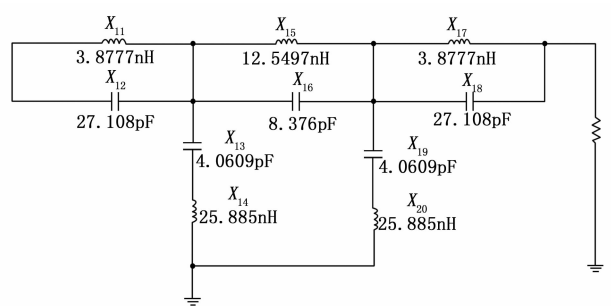
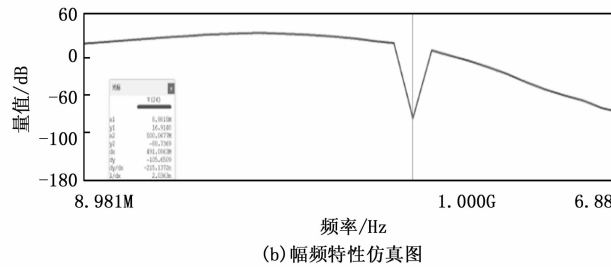


图 10 第二级放大器输出电压仿真结果



(a) 滤波器仿真电路图



(b) 幅频特性仿真图

图 11 5 阶巴特沃斯带阻带阻滤波仿真图

经过带阻滤波器后的信号仿真结果如图 12 所示, 带阻滤波器在阻带范围内衰减速度快, 抑制门控信号的效果很好, 可提取保留雪崩信号, 所以设计的带阻滤波电路是合理可行的。

整形电路的仿真如图 13 所示, 使用电阻 R_{14} , R_{15} ,

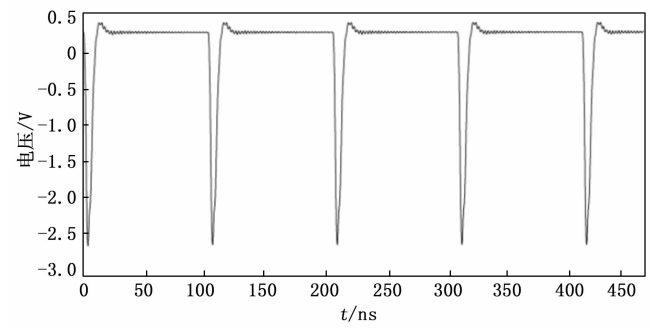


图 12 带阻滤波器输出电压仿真结果

以及 5 V 的电压源, 在 TLV3501 的 3 脚上叠加了 150 mV 阈值水平的参考电压, 最终输出为 5 V 的 CMOS 电平, 整形电路模块的仿真结果如图 14 所示。在实际电路应用中, 可以用滑动变阻器代替分压电阻, 以便于随时调整比较器的阈值电平, 观察阈值电平不同时整形电路的输出结果。

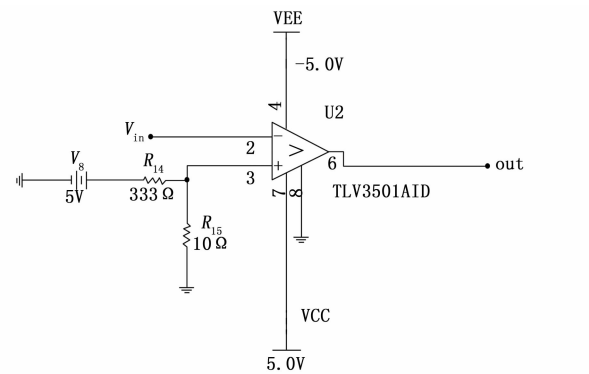


图 13 整形电路仿真图

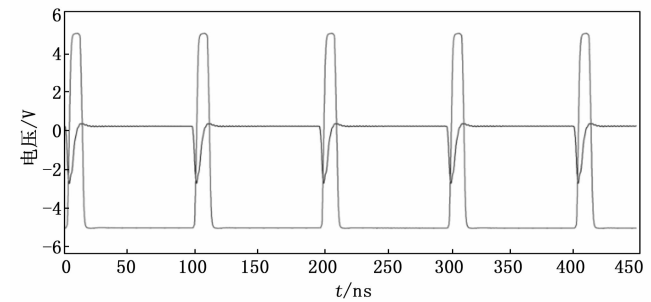


图 14 整形电路输出电压仿真结果

为验证电路整体在所有门控频率内都具有较好的输出结果, 分别将正弦门控频率设置为 100 MHz 与 600 MHz, 即低门控频率与较高的门控频率。在两种不同的正弦门控频率下, 电路输出的仿真结果如图 15 所示, 可以看出两条曲线基本重合。在理想情况下, 门控信号在整个频率范围内连续可调, 得到的仿真输出结果曲线较为平滑。在其他门控频率下, 对于低频门控信号而言, 可调电容的平衡能力可以得到较好的发挥, 对于

高频门控信号而言,在阻带的频率范围内噪声抑制效果更好,阻带中心频率为门控频率时噪声抑制效果最好。因此需要根据门控频率合理进行滤波器及其他部分电路设计。

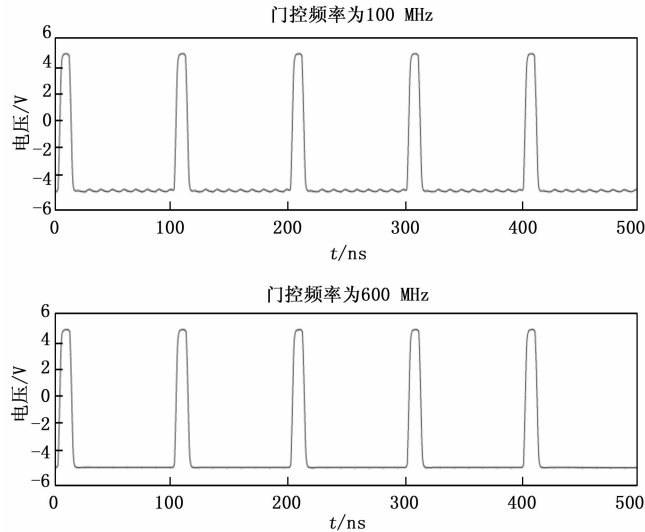


图 15 门控频率不同时,电路输出电压的仿真结果

4 结束语

本文基于盖革模式下 APD 器件的等效电路模型,将电容平衡技术与带阻滤波电路结合起来,进行高频正弦门控淬灭电路及微弱雪崩信号处理电路设计,淬灭雪崩信号并进行放大,滤波,整形后输出数字电平信号。通过对仿真结果进行分析,雪崩信号被快速淬灭并从微分噪声中被完整提取出来并保留,带阻滤波器在阻带范围内衰减效果良好,可以保证门控信号在高频的阻带频率范围内连续可调,解决了电容平衡电路在单光子探测中存在的频率上限问题。仿真结果初步验证电路可行性与正确性。

参考文献:

- [1] SESTA V, SEVERINI F, VILLA F, et al. Spot tracking and TDC sharing in SPAD arrays for TOF LiDAR [J]. Sensors, 2021, 21 (9): 2936.
- [2] WANG Z Y, ZHANG J W, ZHANG Y X, et al. Free-space coupled, large-active-area superconducting microstrip single-photon detector for photon-counting time-of-flight imaging [J]. Applied Optics, 2024, 63 (12): 3130 - 3137.
- [3] LEVINE F B, BETHEA G C. Single photon detection at 1.3 μm using a gated avalanche photodiode [J]. Applied Physics Letters, 1983, 44 (5): 553 - 555.
- [4] NAMEKATA N, SASAMORI S, INOUE S. 800 MHz single-photon detection at 1550 nm using an InGaAs/InP

- avalanche photodiode operated with a sine wave gating [J]. Optics Express, 2006, 14 (21): 10043.
- [5] YUAN L Z, KARDYNAL E B, SHARPE W A, et al. High speed single photon detection in the near infrared [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91 (4): 041114.
- [6] CHEN X L, WU E, WU G, et al. Low-noise high-speed InGaAs/InP-based single-photon detector [J]. Optics Express, 2010, 18 (7): 7010 - 7018.
- [7] 黄梓楠, 梁 焰. 超短脉冲门控高速 InGaAs/InP APD 单光子探测 [J]. 光学仪器, 2018, 40 (4): 15 - 19.
- [8] 刘秉乾. 硅雪崩光电二极管门控读出电路的研制 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- [9] YANG X, YAO C, KANG L, et al. A bio-inspired spiking vision chip based on SPAD imaging and direct spike computing for versatile edge vision [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2024, 59 (6): 1883 - 1898.
- [10] 张 驰. 小面阵三维成像激光雷达原理样机 [D]. 上海: 中国科学院大学 (中国科学院上海技术物理研究所), 2017.
- [11] 陶晓强, 李天义, 徐尉宗, 等. 基于 4H-SiC APD 单光子探测的主动淬灭电路研究 [J]. 激光技术, 2024, 48 (6): 809 - 815.
- [12] 王 哲, 田 娜, 杨 旭, 等. 基于单光子雪崩二极管的成像技术综述 [J]. 集成电路与嵌入式系统, 2024, 24 (5): 10 - 25.
- [13] 陈 青. 基于 GHz 门控的单光子差分探测电路设计 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [14] 匡 华, 鞠国豪, 徐 星, 等. 单光子雪崩二极管 SPICE 仿真模型的建立和应用 [J]. 半导体光电, 2024, 45 (1): 42 - 48.
- [15] MORA D A, TOSI A, TISA S. Single-photon avalanche diode model for circuit simulations [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19 (23): 1922 - 1924.
- [16] 袁 俊, 吴广国, 张国青, 等. SPAD 单光子探测器 SPICE 电路模型的建立与仿真研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29 (1): 62 - 68.
- [17] 孙 颖, 梁 焰. 高速 MPPC 的光子数可分辨探测 [J]. 光学仪器, 2022, 44 (1): 22 - 28.
- [18] 李爽玉, 冯荣尉, 贾冬宇, 等. 一种静电计运算放大器测试电路设计 [J]. 宇航计测技术, 2023, 43 (1): 61 - 67.
- [19] 张盛祥. 基于电容平衡的高速低噪声近红外单光子探测技术 [D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [20] 徐福键, 朱建鑫, 周 岩. LC 型三相无源滤波器设计 [J]. 电力电子技术, 2023, 57 (8): 32 - 35.
- [21] 武媛媛, 徐克欣, 陈 丹, 等. 一种 ADC 前端无源差分抗混叠滤波器设计 [J]. 电子与封装, 2023, 23 (4): 46 - 50.