

基于SiPM的高性能光子数可分辨探究

李新洋¹, 顾涵钦¹, 梁 焰^{1,2*}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²上海量子科学研究中心, 上海

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月14日; 发布日期: 2025年5月23日

摘 要

硅光电倍增管(SiPM)光子数分辨性能受限于暗计数、光学串扰及高频信号堆积等, 无法满足高速光子检测的需求。我们基于被动淬灭SiPM, 采用了高通滤波放大与低噪声射频放大结合的方案, 增强信号幅度的同时抑制基线漂移, 在保障信号完整性的前提下提升多光子雪崩事件的分辨率, 实现了雪崩信号的大动态范围线性提取。高通滤波后, 雪崩信号的下降时间从50.4 ns减小到3.7 ns, 减少了雪崩的堆叠效应, 拓宽了器件的响应带宽。在激光重复频率为10 MHz的条件下, 实现了最多25个光子的光子数分辨。此外, SiPM输出信号的有效采集对其分辨性能至关重要, 我们通过调节示波器垂直采样分辨率, 确定了最适合信号采样的区间, 为后续SiPM光子数可分辨探测器的集成设计以及动态范围优化提供支持。

关键词

硅光电倍增管(SiPM), 光子数可分辨, 高通滤波放大, 垂直分辨率

High-Performance Photon Number Resolution Research Based on SiPM

Xinyang Li¹, Hanqin Gu¹, Yan Liang^{1,2*}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Quantum Science Research Center, Shanghai

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 14th, 2025; published: May 23rd, 2025

Abstract

The photon-number-resolving capability of silicon photomultipliers (SiPM) is constrained by dark counts, optical crosstalk, and high-frequency signal pile-up, limiting their application in high-speed photon detection. In this study, we developed a solution for passive quenching SiPM by integrating

*通讯作者。

high-pass filter amplification with low-noise radiofrequency amplification. This approach enhances signal amplitude while suppressing baseline drift, achieving high-resolution discrimination of multi-photon avalanche events and enabling linear extraction of avalanche signals across a wide dynamic range. After high-pass filter, the avalanche signal fall time was reduced from 50.4 ns to 3.7 ns, effectively mitigating avalanche pile-up effects and expanding the device bandwidth. Under 10 MHz laser repetition rate excitation, the system demonstrated photon-number resolution for up to 25 photons. Furthermore, the effective acquisition of the SiPM output signal is crucial to its resolution performance. We optimized signal acquisition by adjusting the vertical resolution of the oscilloscope to determine the optimal sampling parameters, providing critical guidance for the integrated design and dynamic range optimization of photon-number-resolving SiPM detectors.

Keywords

Silicon Photomultiplier (SiPM), Photon-Number-Resolving, High-Pass Filter Amplification, Vertical Resolution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光子数可分辨探测器(Photon Number Resolving Detector, PNRD)不仅继承了传统单光子探测器的高灵敏度与低噪声特性,更能解析入射光子的数量,如单光子至数十光子量级,突破了传统器件仅能判断“有/无”光子的二元响应局限。在量子通信[1]、激光雷达[2]及生物检测[3]领域展现出独特价值。作为光子数可分辨(Photon Number Resolving, PNR)探测领域的主要手段之一,超导纳米线单光子探测器性能优越,如中国科学院上海微系统与信息技术研究所的李浩、尤立星团队通过 64 通道的多线并行设计和三明治式夹层结构,实现了最高 90%的探测效率和 61 光子的分辨能力[4]。该器件成功应用于量子计算和深空激光通信,但其仍面临低温依赖性强(2.3 K 以下)、多通道集成复杂度高、纳米线制造工艺良率不足及实际应用中背景噪声干扰等问题。相比之下,硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)通过集成数千个独立盖革模式雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)微单元,利用雪崩信号的线性叠加特性,可在室温(-10°C至+40°C)和低偏置电压(<60 V)条件下直接输出与光子数线性相关的电信号,实现实时光子数分辨,同时兼具>40%光子探测效率和强抗电磁干扰特性。SiPM 无需复杂淬灭电路或低温系统的设计,显著降低了系统成本与集成难度,成为当前光子数可分辨探测领域最具实用价值的技术选择之一。

SiPM 通常工作于盖革模式(Geiger mode),即通过施加高于雪崩击穿电压的反向偏压实现单光子灵敏探测[5]。在光子响应过程中,雪崩电流通过串联大阻值电阻产生压降以淬灭雪崩,但该机制导致器件恢复时间显著延长,使时间达数百纳秒至微秒,严重制约其在高速 PNR 探测中的应用。为突破这一限制,当前研究聚焦于电路层面对 SiPM 输出信号的优化,以实现 SiPM 的高速探测。例如,日本 Akiba 团队通过 1.5 GHz 带宽高频电路设计和动态基线校正技术,在单光子探测领域实现突破性进展:系统可分辨 2.6 个光子级别的微弱信号,时间抖动低至<10 ps,在-20°C制冷条件暗计数率控制在<100 cps。该方案结合实时噪声抑制算法与机器学习分类模型,显著提升了光子数分辨能力,但受限于复杂后处理算法及高功耗制冷模块,适用于高精度量子通信与激光雷达等非实时场景[6]。中国科学院刘欣缘团队针对 SiPM 在激光雷达多光子响应场景,建立光子事件响应模型,系统解析脉冲堆叠引发的屏蔽与触发机制。通过鉴别阈值优化算法实现动态范围扩展,在多光子条件下实现线性响应,动态范围覆盖单光子至数十光子量

级,但高光子通量下仍存在脉冲堆叠引发的波形失真问题[7]。上海理工大学孙颖等提出 200 MHz 正弦门控与自平衡技术联合方案,结合低通滤波将容性尖峰噪声抑制至热噪声水平,在 40 MHz 激光重复频率下实现最高 14 个光子的分辨性能,但高频门控电路显著增加了系统复杂度[8],上述案例介绍了对 SiPM 光子数可分辨性能的改善研究,但是都难以兼顾高频率与宽动态范围,限制了器件的 PNR 性能。

针对上述问题,我们提出一种基于高通滤波放大器的 SiPM 信号处理方案,通过减少雪崩信号下降时间以缩短下降时间,提升系统对高频光子事件的响应能力。同时,系统研究了示波器垂直分辨率设置对信号采集质量及光子数分辨性能的影响,揭示了信号动态范围与 PNR 精度的内在关联,为 SiPM 光子数分辨系统的设计与优化提供理论依据。

2. 基于 SiPM 的光子数可分辨探测方案设计

2.1. SiPM 光子数可分辨探测原理

SiPM 由呈矩阵排列的 APD 单元并联构成。各 APD 单元阳极均集成淬灭电阻 R_Q ,其微观结构如图 1(a)所示。当光子入射触发 APD 单元产生雪崩效应时,淬灭电阻通过动态压降调控倍增过程,有效抑制自持放电现象,从而避免因载流子持续倍增引发的结区热损伤。

SiPM 中的 APD 单元的等效电路如图 1(b)所示[9]。在此等效电路中,APD 的结电容 C_d 初始时处于 V_{bias} 的偏置电压下,而图中所示的概念性开关 K 处于断开状态。一旦耗尽层内产生电子-空穴对,开关 K 闭合, C_d 开始通过 APD 的等效串联电阻 R_s 放电[10]。同时, C_d 两端的电位差 V_d 相对于击穿电压 V_{bd} 呈指数衰减。 V_d 的降低削弱了雪崩过程,导致 C_d 的放电电流减小。根据 APD 等效电路的放电电流回路和充电电流回路,可建立以下关系式描述通过 C_d 的净电流 I_d :

$$\frac{V_d - V_{bd}}{R_s} + \frac{V_{bias} - V_d}{R_Q} = I_d \quad (1)$$

由于两个回路的电流方向相反,净电流 I_d 将沿两个电流回路中电流较强方向流动。若在某一时刻 V_d 满足 $V_d - V_{bd} = V_{bias} - V_d$,且淬灭电阻 R_Q 过小,与 R_s 同等量级,则充电电流持续流入 C_d 并通过 R_s 维持放电,形成平衡状态,导致淬灭过程无法发生。相反,若 R_Q 足够大,使得来自 V_{bias} 的电流无法维持 C_d 的放电,雪崩过程将被淬灭。当放电耗尽至最低点时,雪崩终止,概念性开关 K 断开。随后,通过 R_Q 流入 C_d 的充电电流将其两端电压恢复至 V_{bias} ,为下一次雪崩做好准备,就是雪崩的抑制(淬灭)过程。

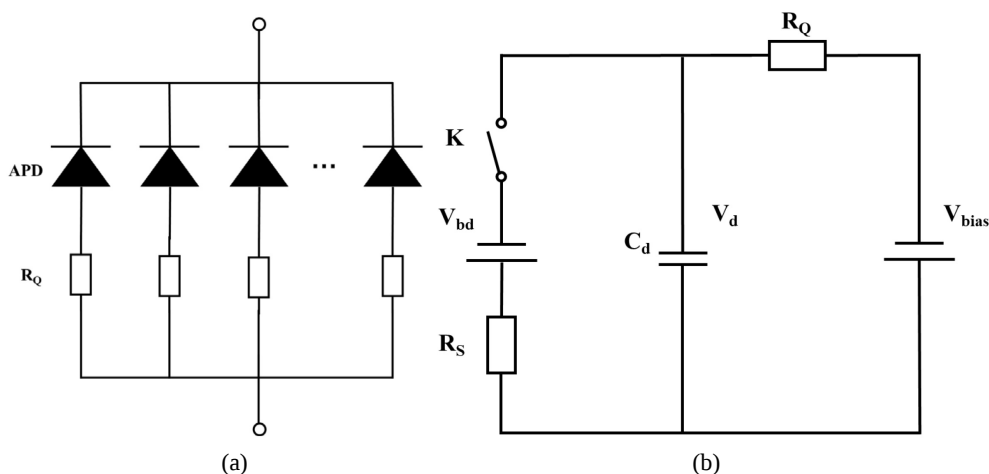


Figure 1. (a, b) SiPM structure diagram, equivalent circuit diagram of the APD unit
图 1. (a, b) SiPM 结构图、APD 单元等效电路图

由上述 APD 单元的抑制过程可知, 结电容 C_d 通过 R_Q 充电的过程为恢复时间, 其由时间常数 τ ($\tau = R_Q \times C_d$) 决定, 其值直接影响到 SiPM 对高频光信号的响应性能[11]。为了缩短雪崩信号的恢复时间, 我们在 SiPM 后接入 RC 时间常数远小于 SiPM 的高通滤波放大器, 通过一阶高通滤波和运算放大器的组合, 减少其雪崩信号的下降时间[12]。高通放大电路的原理图如图 2 所示, 该电路由 C_{filter} 和 R_{filter} 为构成高通滤波模块, 配合运算放大器构成了增益可控的高通滤波放大电路。

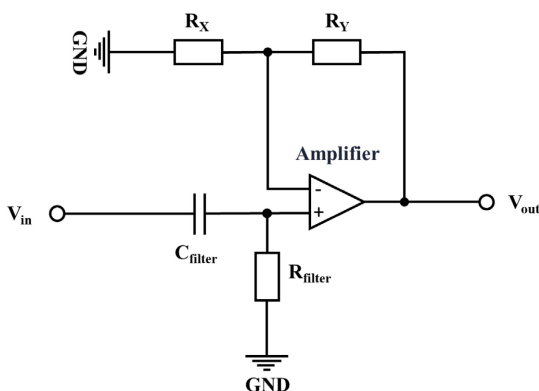


Figure 2. High-pass filter amplifier circuit schematic

图 2. 高通滤波放大电路原理图

高通滤波电路旨在降低 SiPM 的等效电容来缩短其下降时间, 放大电路则补偿增益损失。接入一阶高通滤波电路前后, 雪崩信号的输出脉冲波形如图 3 所示。

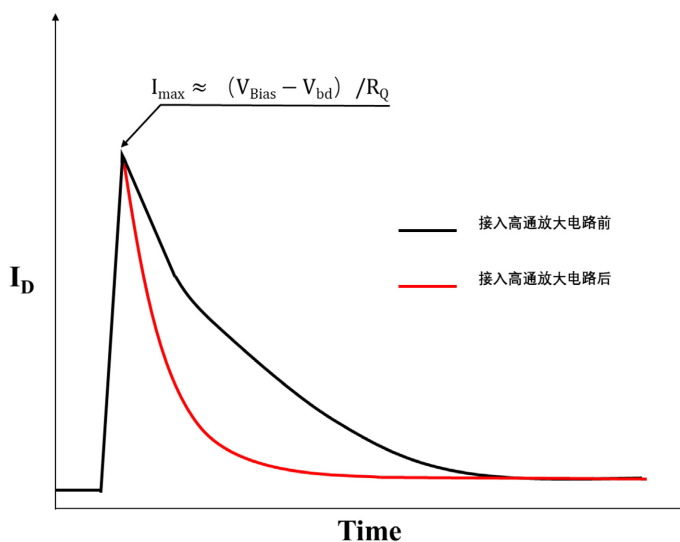


Figure 3. Dynamic response comparison of APD avalanche signals through high-pass filtering amplification circuit

图 3. 通过高通滤波放大电路的 APD 雪崩信号对比图

经过处理的 SiPM 下降时间 T_{fall} 遵循下式:

$$T_{\text{fall}} = 0.35 \times \frac{1}{BW} = 0.35 \times \sqrt{\frac{1}{f_{\text{filter}}^2 + f_{\text{APD}}^2}} \quad (2)$$

式中 f_{filter} 是高通滤波放大器的截止频率, f_{APD} 是 APD 的恢复带宽, 他们的计算方式如下:

$$f_{\text{filter}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{filter}} C_{\text{filter}}} \quad (3)$$

$$f_{\text{APD}} = \frac{1}{2\pi R_Q C_d} \quad (4)$$

基于上述分析,通过优化 RC 参数配置,在保证雪崩信号和增益的完整性情况下,尽可能减少 SiPM 的下降时间,以实现 SiPM 高频响应性能的改善。

2.2. SiPM 光子数可分辨探测方案设计

图 4 所示为基于被动抑制原理的探测电路架构[13]。实验选用型号为 Hamamatsu S13362-3050DG 的 SiPM,其关键参数为:有效感光面积 $3 \times 3 \text{ mm}^2$,3600 个 APD 微元,74%的填充因子及 320 pF 的结电容。SiPM 工作原理包含三级调控机制:1) 高压偏置源 HV 通过淬灭电阻阵列向 APD 网络提供反向偏置,其中保护电阻 R_1 起到限流保护的作用;2) 雪崩电流在淬灭电阻 R_Q 上产生非线性压降,形成动态电势差 $V_{\text{APD}} = HV - I_{\text{avalanche}} \times R_Q$,实现雪崩过程的淬灭;3) 阳极电流经采样电阻 R_L 转换为电压信号[12],通过高通滤波放大器和低噪声放大器两级调理后,最终由数字存储示波器完成波形捕获与量化分析。

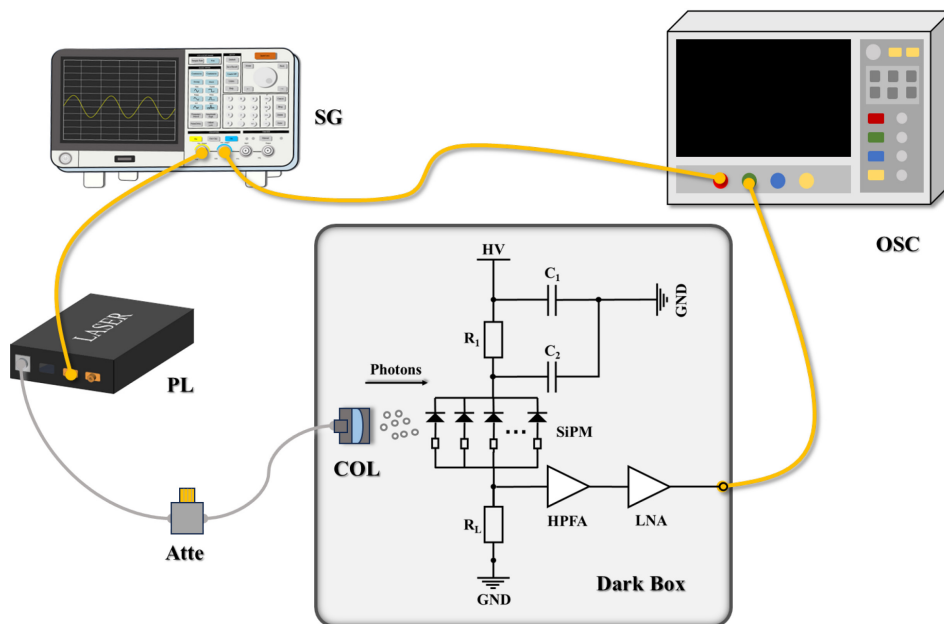


Figure 4. Diagram of experimental device: SG: signal generator/PL: 483 nm Picosecond Pulsed laser/VOA: Variable optical attenuator/COL: Collimating Lens/LNA: Low-Noise Radio Frequency Amplifier/HPFA: High-Pass Filter Amplifier/DR: Darkroom/OSC: Oscilloscope

图 4. 实验装置图: SG: 低频信号发生器、PL: 483 nm 皮秒脉冲激光器、VOA: 可调光衰减器、COL: 准直器、LNA: 低噪声射频放大器、HPFA: 高通滤波放大器、DR: 暗室、OSC: 示波器

实验方案首先是由信号发生器输出两路 10 MHz 的同步触发信号,分别驱动皮秒脉冲激光器(波长 483 nm,脉宽 100 ps)与示波器时基。基于 S13362-3050DG 型 SiPM 在 450 nm 处的峰值响应特性,激光波长选在可见光敏感区。经过可调光衰减器衰减后的激光经光纤准直器形成 $\Phi 2.0 \text{ mm}$ 的平顶光斑,与 SiPM 的感光区实现空间匹配。SiPM 输出信号通过高通滤波放大改善波形拖尾后[14],再经低噪声射频放大器(带宽 1 GHz)放大,最终由示波器采集数据[15]。数字示波器采用 KEYSIGHT MSOS404A 型数字示波器,其带宽为 4 GHz,单通道最大采样率可达 20 Gsa/s,在有一路通道连接同步触发信号时,雪崩波形采样通

道的采样率最高可达 10 Gsa/s, 可以满足采样需求。

SiPM 输出的信号幅度可以由所有光子的幅度叠加表示, 即 n 光子产生的光生信号幅度是符合泊松分布的, 表达式如下:

$$P(V) = \sum_{n=0}^{\infty} P(\mu, n) \times \rho(n, V) \quad (5)$$

式中 $\rho(n, V)$ 是 n 光子激发的雪崩信号幅值 V 分布的概率, $P(\mu, n)$ 表示单脉冲中平均光子数为 μ 时包含 n 光子的概率, 其公式如下式:

$$P(\mu, n) = \frac{\mu^n}{n!} \cdot e^{-\mu} \quad (6)$$

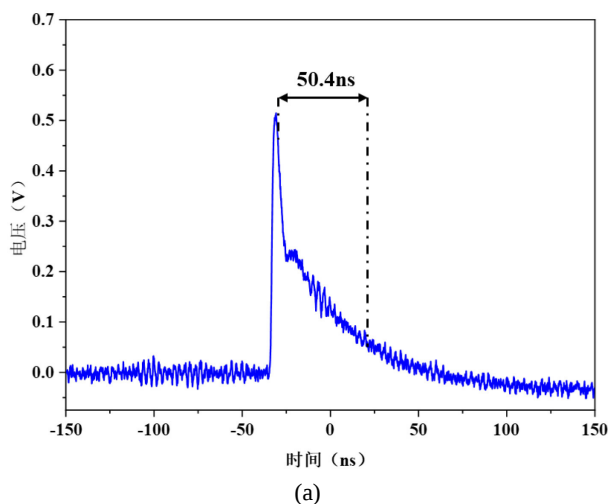
本研究基于电脉冲幅度统计法建立 SiPM 光子分辨模型: 通过提取输出信号幅值分布特征, 采用多峰高斯拟合确定各光子事件对应的电脉冲中心幅值与分布宽度, 进而计算光子数概率分布。实验通过动态调整高斯分布特征参数, 结合最小二乘法优化拟合曲线与实际数据的匹配度, 最终在拟合残差收敛至阈值以下时获得最优解。通过对比高通放大电路接入前后的光子分布特征差异, 评估雪崩信号下降时间对 PNR 性能的影响。

3. 基于 SiPM 的光子数可分辨探测的性能测试

3.1. 响应带宽

响应带宽作为 SiPM 的参数之一, 反映了其高频性能, 主要由雪崩的上升时间 T_{rise} 和下降时间 T_{fall} 决定。S13362-3050DG 型 SiPM 理论上升时间为 0.2 ns, 远小于其下降时间。因此其响应带宽主要由下降时间主导。

雪崩信号下降时间定义为: 雪崩电流从峰值幅值的 90% 衰减至 10% 所需的时长 T_{fall} , 其物理本质由淬灭电阻 R_Q 与结电容 C_d 构成的 RC 时间常数 τ 主导, 过长的下降时间将引发脉冲堆积效应, 导致光子计数率受限及动态范围收窄。实验将经过调制的激光衰减到合适水平, 在相同的入射光子数条件下, 对比测试高通滤波电路接入前后的雪崩信号下降时间, 入射光重复频率为 10 MHz, 波长为 483 nm, 示波器采样率为 10 Gsa/s。如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 接入高通滤波后下降时间由 50.4 ns 缩短至 3.7 ns, 根据带宽和下降时间的关系公式 $t = 0.35/f$ 可计算得出对应的响应带宽从 6.94 MHz 提升至 94.59 MHz。该结果验证了高通滤波放大电路通过压缩时间常数 τ , 提升了 SiPM 的高频响应性能。



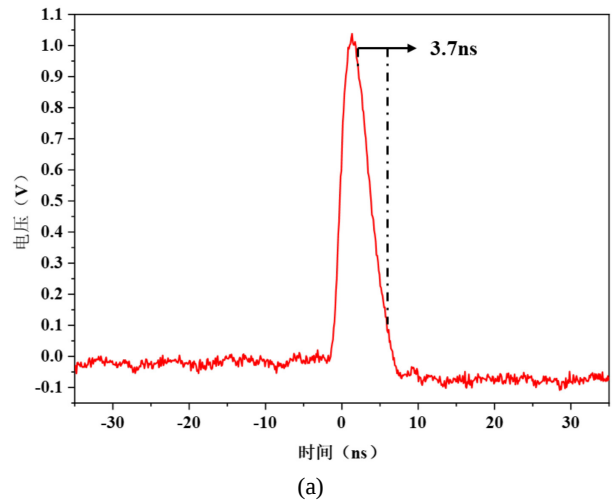
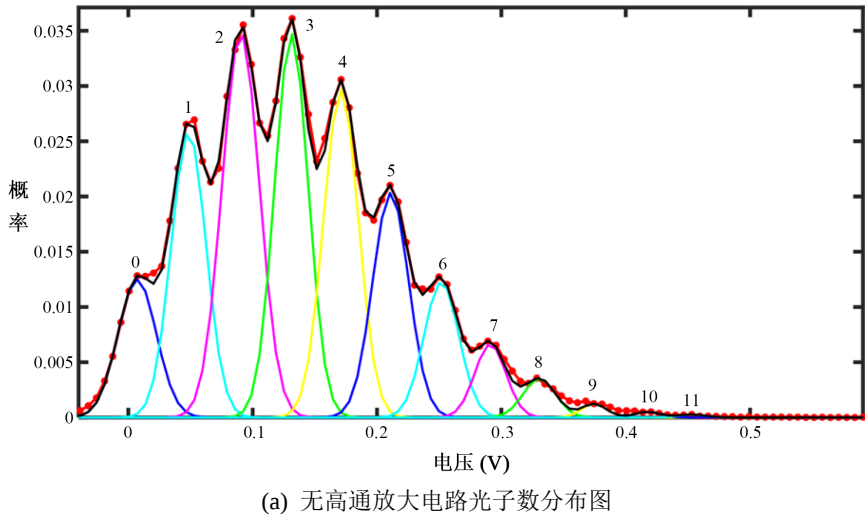


Figure 5. Waveform comparison of avalanche signals with/without high-pass filtering amplification circuit (a) Without HPFA circuit; (b) With HPFA circuit
图 5. 基于高通放大电路的雪崩信号波形对比(a) 无高通滤波放大电路; (b) 含高通滤波放大电路

3.2. PNR 性能

SiPM 输出脉冲幅度与其探测到的光子数在动态范围内呈线性响应，实验通过调节可调光衰减器改变入射光单脉冲平均光子数 μ ，分别测试在接入高通放大电路前后 SiPM 的最大可分辨光子数。示波器在 10 GSa/s 采样率和 1 M 存储深度设置的条件下运行，此时入射光为重复频率 10 MHz，波长 483 nm 的脉冲光，通过 MATLAB 上位机程序采集 300 屏示波器数据并提取其中的雪崩脉冲的幅度值，结合示波器垂直分辨率设定幅度区间，构建具有离散峰值的雪崩脉冲幅度分布直方图，并进行拟合处理，结果如图 6 所示。

图 6 光子数分布曲线直观揭示了 SiPM 的多光子分辨机制，各离散峰对应特定光子数事件，如 0 光子、1 光子、2 光子等。对比实验表明，引入高通滤波放大电路后，有效抑制相邻光子峰间的重叠效应，系统动态范围有所扩展。原始系统图 6(a)显示因雪崩拖尾限制，最大可分辨光子数止于 11 光子，且峰间存在显著交叠；优化系统如图 6(b)显示通过信号整形将可分辨光子数提升至 25 光子。该结果验证了高通滤波放大电路对雪崩信号下降时间的整形以及对 SiPM 动态边界的拓展效应。



(a) 无高通放大电路光子数分布图

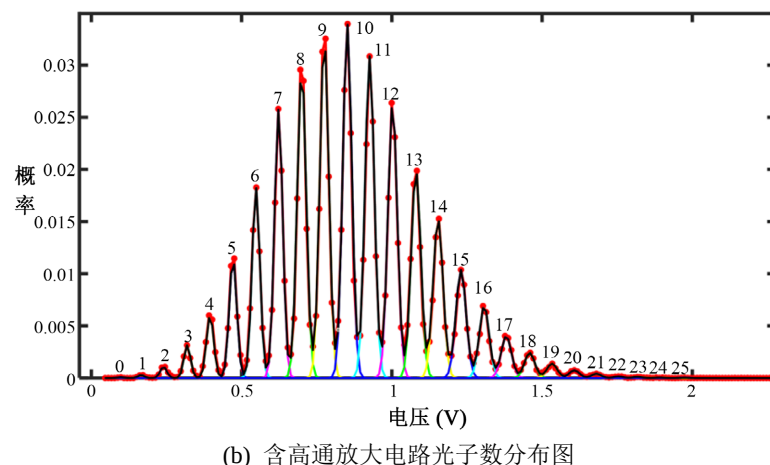


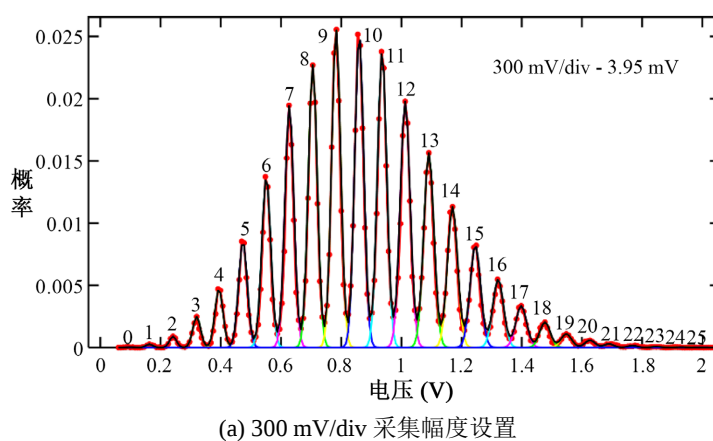
Figure 6. Photon number statistics comparison (a) Without HPFA circuit; (b) With HPFA circuit
图 6. 光子数分布图对比(a) 无高通放大电路; (b) 含高通放大电路

4. 示波器垂直分辨率设置对 SiPM 性能的影响

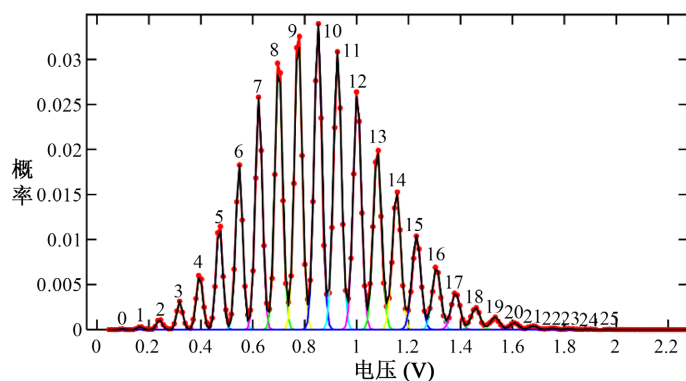
4.1. 不同示波器垂直分辨率设置下的数据采集

在 PNR 应用中, SiPM 的性能不仅取决于其自身响应时间, 还与信号采集系统的参数配置相关。光子数分布特性直接由雪崩信号幅度分布决定, 示波器垂直分辨率的设置能够有效影响雪崩信号幅度的采集, 进而影响最终的光子数分辨效果。为定量评估垂直分辨率设置对分辨性能的影响, 我们在 483 nm、10 MHz 脉冲激光激励下, 在 10 GSa/s 采样率下通过调节示波器垂直幅度参数改变采样的垂直分辨率, 采集 SiPM 输出雪崩信号并构建光子数分布直方图。

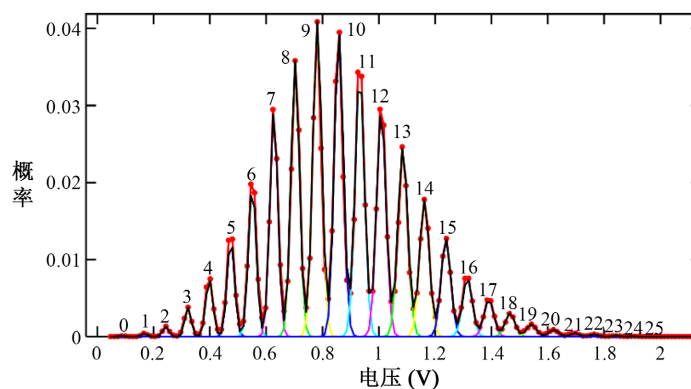
在上述实验条件下, SiPM 雪崩峰值幅度约为 2.3 V。在确保示波器动态范围完全覆盖雪崩脉冲的前提下, 逐步降低雪崩信号在示波器采集窗口的占比, 设计了 300~800 mV/div 的 6 组垂直刻度参数开展对比测试, 对应的垂直分辨率区间为 3.95 mV~10.54 mV。对应的示波器采样范围是 2.4 V~6.4 V, 数据拟合结果如图 7(a~e)所示。结果表明, 当入射平均光子数水平保持稳定时, 系统最大可分辨光子数稳定在 25 个。但随着示波器垂直刻度增加, 相邻光子数对应的雪崩信号幅值分布交叠概率增加, 导致拟合的曲线与实际曲线的重合度逐渐降低, 表现为部分光子峰的波峰和波谷曲线呈现平坦化, 如图 7(f) 800 mV/div 设置下的 5 光子和 10 光子等。实验结果表明, 增大垂直刻度会降低示波器的垂直采样率, 劣化信号幅度的量化精度, 导致相邻光子事件的统计分布产生混叠效应。



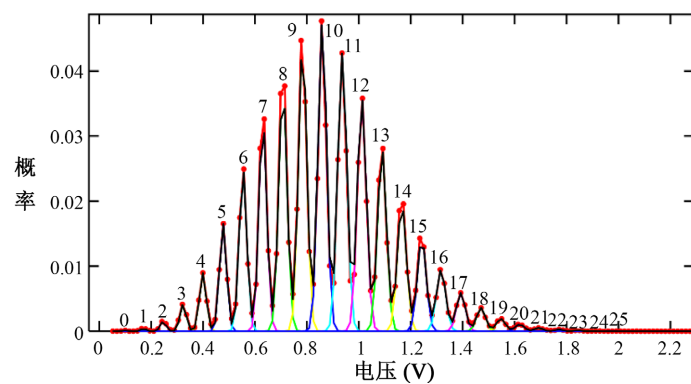
(a) 300 mV/div 采集幅度设置



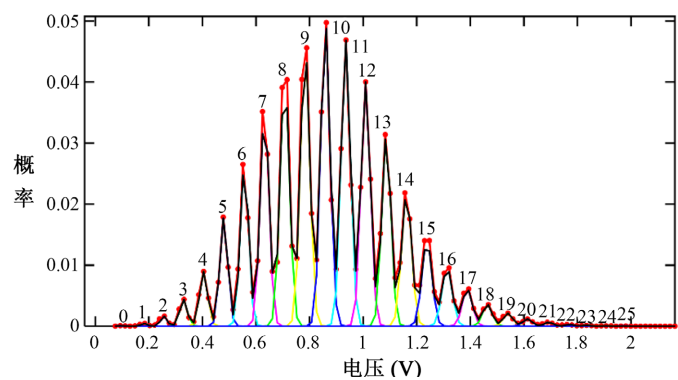
(b) 400 mV/div 采集幅度设置



(c) 500 mV/div 采集幅度设置



(d) 600 mV/div 采集幅度设置



(e) 700 mV/div 采集幅度设置

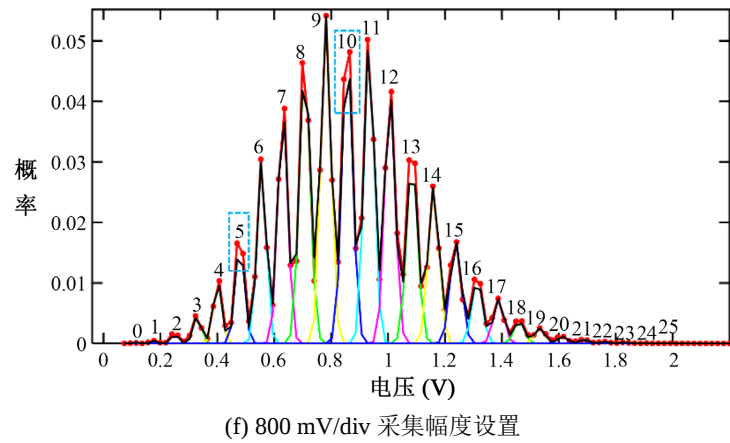


Figure 7. (a~f) distribution of avalanche amplitudes under different oscilloscope amplitude settings
图 7. (a~f) 在不同示波器幅度设置下的雪崩幅度分布图

4.2. 不同示波器垂直分辨率设置下的光子数分辨系数

为定量评估不同示波器垂直分辨率设置下的光子数分辨效果，引入光子数分辨系数作为评价指标。示波器采集实验数据后得到的光子数分辨拟合图是由不同高斯曲线构成，每条高斯曲线下面积表示该光子的概率。高斯曲线的半高宽为该光子的标准差，高斯曲线中心对应的电压幅值为该光子的中心峰值电压。光子数分辨系数定义为光子数分辨效果拟合图中某光子的高斯曲线半高宽与其相邻光子间峰值中心电压之差的比值，如下式。

$$A_{i,j} = \frac{a_i}{b_{i,j}} (i = 1, 2, 3, \cdots; j = i + 1) \tag{7}$$

式中 $A_{i,j}$ 为光子数分辨系数； a_i 为 i 光子对应光子数分辨拟合图中该光子高斯曲线的半高宽； $b_{i,j}$ 为 i 光子与 j 光子间的中心电压之差，对应光子数分辨拟合图中相邻两光子的高斯曲线峰对应的中心电压幅值之差。光子数分辨系数越小，说明对应的光子数分辨效果越好，因为这表明系统在抑制噪声(半高宽降低)和增强信号分离度(中心电压差升高)两方面达到更优平衡。

Table 1. Mean and standard deviation of photon number resolving coefficients
表 1. 光子数分辨系数的平均值和标准差

垂直分辨率设置	平均值	标准差
3.95 mV	0.408359	0.061329
5.27 mV	0.390232	0.061943
6.59 mV	0.397487	0.065740
7.90 mV	0.407190	0.062302
9.22 mV	0.437803	0.054016
10.54 mV	0.453199	0.062245

我们计算了 3.1 节所示不同垂直分辨率设置下各个光子峰对应的光子数分辨系数，并对其平均值与标准差进行了分析，从集中趋势和离散程度两方面进一步探究示波器垂直分辨率设置对光子数分辨性能的影响，结果见表 1。表 1 中数据显示：5.27 mV 垂直分辨率设置下光子数分辨系数平均值最低为 0.390232，

表明该条件下整体光子数分辨能力最优；当垂直分辨率设置增至 6.59~10.54 mV 时，分辨系数平均值随垂直分辨率增大呈上升趋势，分辨性能逐步下降。离散性方面，除 9.22 mV 组外，其余组别标准差均维持相近水平。而 9.22 mV 组虽达到最低标准差 0.054016，但其平均值显著偏高为 0.437803，导致了整体分辨性能的劣化。

结合 3.1 节和 3.2 节，在示波器垂直分辨率设置的选择上，应在示波器采样范围大于雪崩信号峰值幅度的情况下，选择合适的垂直采样分辨率，提高对雪崩脉冲的采样精度，从而提升光子数分辨效果。5.27 mV 设置下垂直分辨率最高，但雪崩信号幅度与示波器采样范围相近，导致采样动态范围受限。在 6.59~10.54 mV 设置下，示波器垂直采样率逐渐降低，信号动态范围增大，雪崩信号占比变小，易造成采样误差。经过多次信号采样分析，在 5.27 mV 的采样垂直分辨率设置下，不仅呈现最低的分辨系数，同时也能保持采样的稳定性，是提升光子数分辨可靠性的理想选择。

5. 结论

本研究提出基于被动淬灭电路与高通滤波放大技术协同作用的 SiPM 的 PNR 性能增强方案，将雪崩信号下降时间从 50.4 ns 减小至 3.7 ns，拓展了其频率响应范围。在激光重复频率为 10 MHz，激光波长 483 nm 的实验条件下，系统最大可分辨光子数由 11 提升至 25，实现动态范围倍增。通过系统分析示波器垂直刻度参数与光子数分辨系数的量化关联，证实选择合适的示波器垂直分辨率范围可适当提升光子数分辨效果。本实验从信号处理优化与采集参数配置两个维度，为高性能光子数分辨探测系统的工程实现提供理论支撑与设计参考。

基金项目

国家自然科学基金(62175152)，上海市市级科技重大专项(2019SHZDZX01)。

参考文献

- [1] 周飞, 王向斌. 实用化量子通信技术[J]. 信息安全研究, 2017, 3(1): 80-85.
- [2] 惠俊, 柴洪洲, 向民志, 等. 量子增强星载光子计数激光雷达阈值检测性能[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(4): 150-160.
- [3] 王晓辉, 胡新奇, 俞信, 等. 光子计数成像探测系统及其在生命科学中的应用[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(4): 107-110.
- [4] Zhang, T., Huang, J., Zhang, X., Ding, C., Yu, H., Xiao, Y., *et al.* (2024) Superconducting Single-Photon Detector with a Speed of 5 GHz and a Photon Number Resolution of 61. *Photonics Research*, **12**, 1328-1333. <https://doi.org/10.1364/prj.522714>
- [5] 阎珍德. MPPC 简介及其性能测试[J]. 电子测试, 2018(15): 49-50.
- [6] Akiba, M., Inagaki, K. and Tsujino, K. (2012) Photon Number Resolving SiPM Detector with 1 GHz Count Rate. *Optics Express*, **20**, 2779-2788. <https://doi.org/10.1364/oe.20.002779>
- [7] 刘欣缘, 肖毅, 马跃, 等. 不同鉴别阈值条件下 SiPM 光子计数激光雷达探测模型及性能分析[J]. 红外与毫米波学报, 2023, 42(6): 863-873.
- [8] 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.
- [9] Gola, A., Ferri, A., Tarolli, A., *et al.* (2013) A Novel Approach to Position-Sensitive Silicon Photomultipliers: First Results. 2013 *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference* (2013 NSS/MIC), Seoul, 27 October 2013-2 November 2013, 1-4,
- [10] Buzhan, P., Dolgoshein, B., Filatov, L., Ilyin, A., Kantzerov, V., Kaplin, V., *et al.* (2003) Silicon Photomultiplier and Its Possible Applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **504**, 48-52. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)00749-6](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)00749-6)
- [11] Gundacker, S., Turtos, R.M., Auffray, E., Paganoni, M. and Lecoq, P. (2019) High-Frequency SiPM Readout Advances Measured Coincidence Time Resolution Limits in TOF-PET. *Physics in Medicine & Biology*, **64**, Article 055012.

<https://doi.org/10.1088/1361-6560/aafd52>

- [12] 刘红敏, 龙金燕, 代雷, 等. 大动态范围外延电阻淬灭型硅光电倍增器[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 535-541.
- [13] 桑涛, 郝晓剑, 张根甫. 硅光电倍增管(SiPM)适配电路设计[J]. 光电技术应用, 2015(4): 46-50.
- [14] 成伟帅. 用于硅光电倍增管读出的前端集成电路研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [15] Siminfar, A.R. and Shoaie, O. (2019) Development of a Passive Quenching SiPM-Based Detection System for Quantification of Real Time PCR Products Based on Fluorescence Lifetime. *Journal of Instrumentation*, **14**, P05019.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/05/p05019>