

文章编号: 1005-5630(2022)01-0022-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.01.004

高速 MPPC 的光子数可分辨探测

孙 颖, 梁 焰

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了提高多像素光子计数器(MPPC)的高速探测并改善光子数分辨特性, 采用门控抑制的 MPPC, 并通过自平衡及低通滤波相结合的技术手段, 将 MPPC 的容性尖峰噪声抑制到热噪声水平, 在实现光生雪崩信号的线性提取的同时快速恢复探测。实验结果表明, 200 MHz 门控的 MPPC 实现了 40 MHz 重复频率激光下 14 个光子的有效分辨, 平均每脉冲光子数高达 6.8。与被动抑制模式相比, 200 MHz 正弦门控模式下的光子数分辨效果明显得到了改善, 为高速光子数可分辨探测提供了参考。

关键词: 光子数可分辨探测; 多像素光子计数器(MPPC); 单光子探测
中图分类号: TN 215 **文献标志码:** A

High-speed photon-number resolving detection with MPPC

SUN Ying, LIANG Yan

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the multi-pixel photon counter (MPPC) high-speed detection and improve the photon-number to distinguish features, we use the gated suppression MPPC, and combine the self-balancing and low-pass filtering technology to suppress the capacitive-spike noise of MPPC down to the thermal noise level, realizing the linear extraction and rapid recovery detection of photogenerated avalanche signal. The experiment result shows that the 200 MHz gated MPPC achieves the effective resolution of 14 photons of the 40 MHz repetition frequency lase with the average detected photon number is up to 6.8 per pulse. Compared with the passive suppression mode, the photon number resolution in the 200 MHz sinusoidal gated mode is obviously improved, which provides a reference for high-speed photon-number resolving detection.

Keywords: photon number resolvable detection; multi-pixel photon counter(MPPC); single photon detection

收稿日期: 2021-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(11604209); 上海市科技重大专项(2019SHZDZX01)

作者简介: 孙 颖(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为量子探测。E-mail: 1185601463@qq.com

通信作者: 梁 焰(1986—), 女, 副教授, 研究方向为量子探测。E-mail: yanliangSPD@163.com

引 言

多像素光子计数器(MPPC)可对单光子实现光子数目的计数^[1]。由于 MPPC 具有高灵敏度、大动态范围、高增益、低功耗以及易集成等优势被应用于生物成像、高能物理研究、生物检测以及激光测绘等领域^[2]。MPPC 由多个独立硅基雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)像素单元并联而成,通过串联的大阻值电阻在发生雪崩效应时产生压降,迅速拉低 APD 两端的电压^[3]。由于其阻值过大导致探测的恢复时间缓慢,死时间(探测器进行一次有效光子探测后,准备下一次光子探测的时间)长达几百纳秒甚至微秒,难以实现高速的光子数可分辨(photon-number resolving, PNR)探测。目前,研究人员利用后续电路对输出的雪崩信号进行处理,实现了 MPPC 的高速光子数分辨探测。例如,瑞士 Eraerds 等^[4]采用了高通滤波器滤除 MPPC 的低频信号实现其高速的 PNR 探测,但是该方法无法保证雪崩信号的完整性,致使探测效率仅有 16%,远远低于未滤波的 MPPC。日本 Akiba 等^[5]使用高频电路板以及基线校正对输出信号进行处理,实现了 GHz 的工作速度以及 2.6 光子的 PNR 探测,但是该方法实现过程复杂且处理过程缓慢。为了实现高效且简单操作,本文采用基于 MPPC 的高速 PNR 探测方法。区别于上述传统的被动抑制模式,本文将门控信号加载在 MPPC 上,利用门控信号控制 APD 两端的偏置电压以实现 PNR 探测的有效淬灭和恢复,并引入光子数分辨系数对比评估被动抑制模式以及正弦门控抑制模式下的光子数分辨效果。

1 基于被动抑制模式下的 MPPC 的 PNR 探测

1.1 激光不同重复频率下的 PNR 探测特性

本文将门控信号加载在 MPPC 上实现 PNR 探测的有效淬灭和恢复。但是,由于 MPPC 是容性器件,门控信号在 APD 两端充放电后会产生

尖峰噪声,并且由于门控盖革模式下缩短了雪崩信号发生时间,致使雪崩信号微弱,其幅值远远小于尖峰噪声,增加了雪崩信号的提取难度。基于此,门控抑制模式的 MPPC 需要尖峰噪声抑制技术来提取雪崩信号^[6]。尖峰噪声抑制技术通常应用于 InGaAs APD 的单光子检测领域,包括自平衡、正弦门控、频谱滤波等多种技术,可以实现噪声抑制比 30 dB 以上的高性能探测^[7-8]。然而, MPPC 由多个 Si APD 并联而成,其等效电容远大于单个 InGaAs APD 的电容,对抑制技术提出了更高的要求^[9]。

基于 MPPC 的探测系统被动抑制电路原理如图 1 所示。本文采用的 MPPC(S13362-3050DG, Hamamatsu)的参数为:感光区尺寸 3 mm×3 mm,像素数 3 600,填充因子 74%,结电容 320 pF^[10]。被动抑制电路中的直流偏压 HV 串联大阻值的淬灭电阻 R_Q 并加在 APD 阴极上, R_Q 阻值为 100 k Ω 。实际加在 Si APD 上的偏置电压为 HV 与 R_Q 的压降差, APD 阳极通过阻值为 50 Ω 的接地电阻 R_L 将光电流转换为光电压,输出具有入射光信息的雪崩信号。

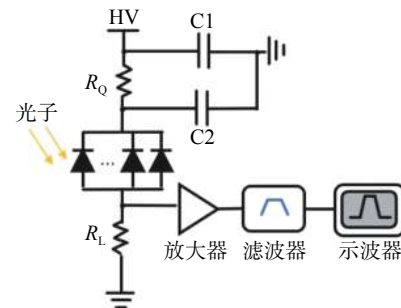


图 1 MPPC 的被动抑制电路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of passive suppression circuit of MPPC

图 2 为基于 MPPC 的 PNR 探测系统的输出波形示意图。本文研究了工作在被动抑制模式下 MPPC 对不同速率光信号的响应。采用波段为 650 nm 的激光光源,脉冲光的宽度约为 10 ns。MPPC 响应入射光后经放大器放大了雪崩信号的电压幅值,再经低通滤波器滤除放大器产生的高频自激振荡,最后在高速示波器输出波形,该波形如图 2 所示。在示波器的余晖模式下,调节偏置电压使 MPPC 的增益固定,从而使响应 1 光

子时的输出电压幅值固定，探测到的光子数不同则电脉冲幅值不同，从而使波形出现明显的分层效果。从图 2 可看出，已有效分辨出了 6 个光子，并且雪崩信号的幅值约为 600 mV，信号脉宽约为 10 ns。但是，雪崩信号的拖尾大于 40 ns，表明被动抑制模式下 PNR 探测系统的恢复时间缓慢，无法实现高速的 PNR 探测。

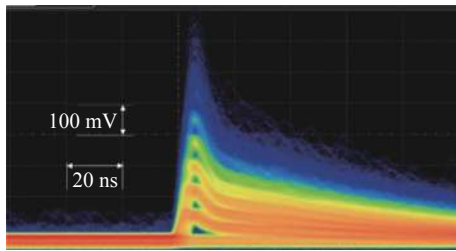


图 2 基于 MPPC 的探测系统输出信号图
Fig. 2 The output signal diagram of detection system based on MPPC

MPPC 通过半导体制冷的方式制冷至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，可有效地减小电路中的暗电流，保障其分辨性能。本文通过逐渐提高光信号的重复频率，即将重复频率由 1 MHz 逐渐增加到 40 MHz，研究基于 MPPC 的高速 PNR 探测特性。通过可调衰减器调节入射光强，保证 MPPC 探测到的光子数为每脉冲 2.3 光子，最终 MPPC 输出信号的峰值电压分布如图 3 所示。因输入光信号为相干

光，其总体概率分布满足泊松分布，具体是由多个光子的高斯分布曲线叠加而成，所以 MPPC 输出信号的峰值电压分布亦如此。图 3 中： x 坐标表示输出信号的峰值电压； y 坐标为入射光的不同重复频率，分别为 1 MHz、10 MHz、20 MHz 以及 40 MHz； z 轴坐标为归一化的概率值。以图中光脉冲信号的重复频率 1 MHz 时 MPPC 输出信号的峰值电压分布曲线为例：各个峰值代表不同的光子数；各光子峰的中心间隔明显，能有效分辨出 0 光子至 7 光子。从图 3 显示的 4 条峰值电压分布曲线中可大概看出，随着光重复频率的增加，相邻光子间重叠面积逐渐增加且分辨的光子数目逐渐减少。例如，激光重复频率为 1 MHz 时可有效分辨出 8 个光子数，而 40 MHz 时仅能有效分辨出 5 个光子，表明光子数分辨能力随着激光重复频率的增加逐渐变差。

为了更直观地评估不同激光重复频率下 PNR 探测特性的差异，本文引入光子数分辨系数。将该系数定义为：MPPC 输出信号的峰值电压分布(0 光子除外)的高斯曲线的半高宽与其相邻光子间两光子峰对应的中心电压差的比值，其表达式如下：

$$a_{i,j} = \frac{A_i}{B_{i,j}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots; j = i + 1) \quad (1)$$

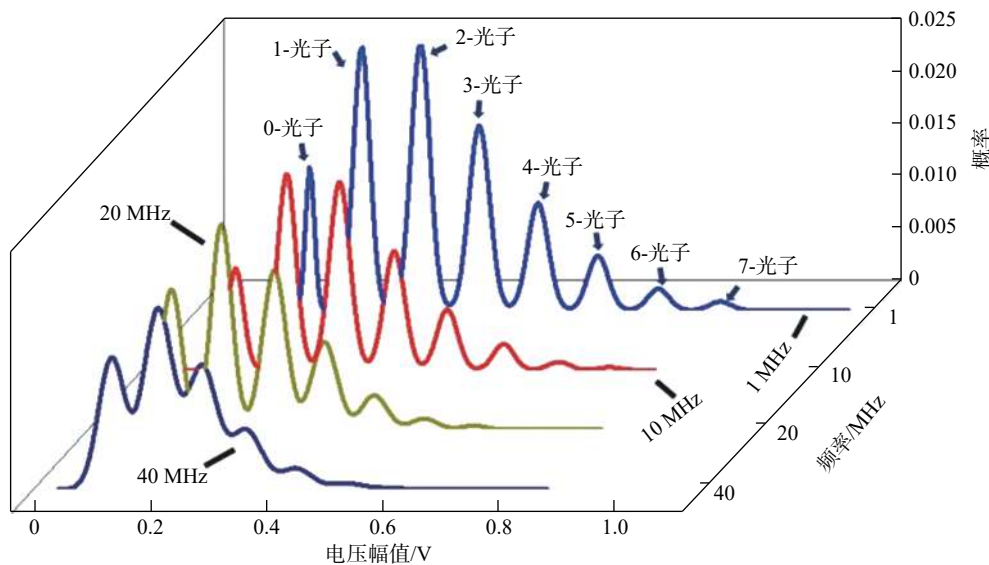


图 3 不同重复频率输入光信号下 MPPC 输出信号峰值分布

Fig. 3 MPPC output signal peak distribution under different repetition frequency input optical signals

式中: A_i 为 i 光子正态分布的标准差, 对应 MPPC 输出信号的峰值电压分布图中 i 光子的高斯曲线的半高宽; B_{ij} 为 i 光子与相邻的 j 光子的中心电压间隔, 对应峰值电压分布图中 i 光子与 j 光子两个高斯曲线峰所对应的电压幅值间隔。峰值电压分布图中光子高斯曲线的半高宽越窄, 其相邻光子间的中心电压间隔越大, 即光子数分辨系数越小, 则光子分辨效果越好^[7]。在图 3 所示的峰值电压分布图中, 前 5 个光子(包括 0 光子)所占概率大, 可代表该次探测时的 PNR 特性。由

于实验过程中 PNR 探测系统的噪声水平低且在每脉冲 2.3 光子时 0 光子的分布概率少, 因此引入的光子数分辨系数不包括 0 光子。当光重复频率为 1 MHz 时, 1 光子的标准差为 0.0283, 1 光子与 2 光子的峰值电压的中心间隔为 0.1, 故 1 光子的光子数分辨系数为 0.283。以此类推, 得到所有光子的光子数分辨系数如表 1 所示。表 1 中 $a_{1,2}$ 为 1 光子的光子数分辨系数, $a_{2,3}$ 为 2 光子的光子数分辨系数, $a_{3,4}$ 为 3 光子的光子数分辨系数, $a_{4,5}$ 为 4 光子的光子数分辨系数。

表 1 不同重复频率激光的光子数分辨系数

Tab. 1 Photon number resolution coefficients of lasers with different repetition frequencies

光信号重复频率	$a_{1,2}$	$a_{2,3}$	$a_{3,4}$	$a_{4,5}$
1 MHz	0.283	0.320	0.350	0.343
10 MHz	0.344	0.376	0.389	0.365
20 MHz	0.389	0.471	0.506	0.512
40 MHz	0.667	0.667	0.639	0.629

由表 1 可知: 光信号重复频率逐渐增大后, 光子数分辨系数整体也逐渐增大; 光信号重复频率为 1 MHz 时, 2 光子的光子数分辨系数 0.320, 与 10 MHz 时 2 光子的分辨系数 0.376 相比, 双方的光子数分辨系数相差较小, 表明此时不同光信号重复频率下的 PNR 探测能力相差不大; 当光信号重复频率提高至 20 MHz 时, 1 光子的光子数分辨系数为 0.389, 与光信号重复频率为 40 MHz 时, 1 光子的分辨系数 0.667 相比, 光子数分辨系数相差较大且后者的光子数分辨系数更大, 表明光信号重复频率为 40 MHz 时的 PNR 探测能力显著下降。如图 3 所示, 光信号重复频率分别为 1 MHz 和 10 MHz 时, 光子数分辨效果不相上下, 而当光信号重复频率分别为 20 MHz 和 40 MHz 时, PNR 探测系统可有效分辨的光子数逐渐减小, 光子数分辨能力逐渐变差。光子数分辨系数的评估结果与 MPPC 输出信号的峰值电压分布曲线相吻合, 验证了随着光信号重复频率的增加, 探测系统的光子数分辨效果逐渐变差, 尤其是光信号重复频率增加到 40 MHz 时, 光子数分辨系数急剧增大, 光子数分辨能力显著变差。

2 基于门控抑制模式下的 MPPC 的 PNR 探测技术

2.1 门控抑制模式下的 PNR 探测

基于 MPPC 的光子数可分辨探测系统工作在被动抑制模式下时, PNR 探测能力随着计数率增加而变差^[11]。为了有效地提高雪崩信号的淬灭速率, 进而改善高计数率下的光子数分辨能力, 本文研究在门控抑制模式下的基于 MPPC 的高速 PNR 探测特性。200 MHz 正弦门控 MPPC 的 PNR 探测系统的实验装置如图 4 所示。

信号发生器传出多路信号: 其中一路作为触发信号, 触发光纤激光器产生中心波长为 650 nm 的脉冲光, 该脉冲光经过可调衰减器衰减至单光子水平, 再经过准直器入射到 MPPC 光敏面上; 另一路产生重复频率为 200 MHz 且幅值为 5 V 的正弦门控信号, 该信号经过带通滤波器后通过电容加载在 MPPC 上。由于 200 MHz 正弦信号的频率单一, 经过 MPPC 电容充放电产生的尖峰噪声只含有正弦波基频以及谐波频率, 故可在频域上采用滤波法滤除尖峰噪声^[12]。由于

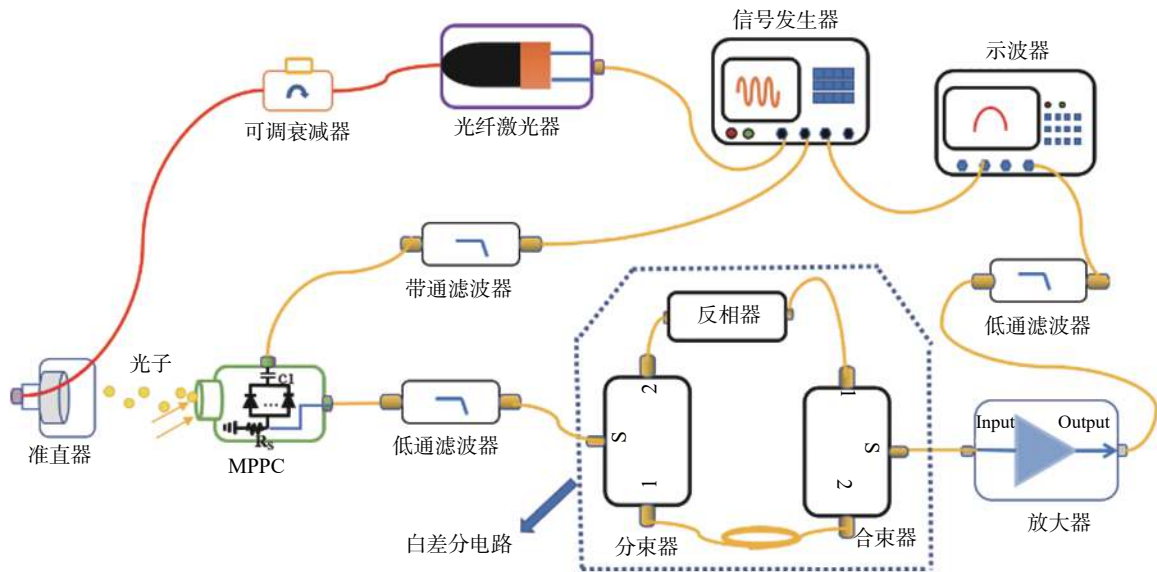


图 4 门控抑制模式下的实验装置图

Fig. 4 Diagram of experimental setup in gated suppression mode

雪崩信号多集中分布在低频部分，为了保证雪崩信号的完整性，对 APD 的输出信号采用低通滤波处理^[13]。因此，通过截止频率为 150 MHz 的低通滤波器滤除 MPPC 输出信号的尖峰噪声。但是，在示波器上观察到尖峰噪声的峰值电压为 2 V，由于其幅值过大无法完全滤除，需要进一步采用自平衡差分法。故将滤波器初步滤波后的信号经过分束器分成两路：一路经过反相器进行反相；另一路经过长度不同的电缆线形成延时，该延时时间正好为 5 ns。该两路信号最后经过合束器将相邻两个周期内的尖峰噪声完全抵消，留下有效的雪崩信号，该雪崩信号再经过放大器放大后输出。由于门控抑制模式下的 PNR 探测系统在门内才能进行光子的有效探测，故调节正弦门信号与光脉冲信号之间的延时时间可得到最佳的光子数分辨效果。最后，通过高速示波器采集输出的电脉冲信号。

光信号重复频率为 20 MHz 且探测效率为 30% 时，调节基于 MPPC 的 PNR 探测系统的入射光强，使其探测到每脉冲 4.5 光子，得到在两种不同的工作模式下的光子数分布概率图，如图 5 所示。

200 MHz 正弦门控抑制模式下的 PNR 探测系统其暗计数为 2 kHz，可有效分辨出 11 个光子；被动抑制模式下其暗计数为 15 kHz，可有效分辨出 10 个光子。与被动抑制模式相比，门控抑制模式下 PNR 探测系统的暗计数小且分辨

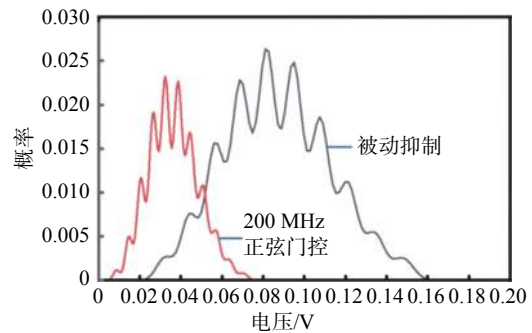


图 5 不同工作模式下的实验结果

Fig. 5 Experimental results under different working modes

的有效光子数目多，表明门控抑制模式改善了光子数分辨效果。但是，由于门控抑制模式极大的缩短了雪崩信号发生时间致使雪崩信号的输出强度减小，峰值电压分布图中雪崩信号的极限电压幅值整体变小。与被动抑制模式相比，200 MHz 正弦门控模式下的 PNR 探测系统由于雪崩信号幅值小，导致其光子数分辨能力的优势很难被体现出来，故本文利用光子数分辨系数评估两种模式的 PNR 探测效果。

当 PNR 探测系统响应为每脉冲 4.5 光子时，2 光子至 7 光子的概率分布所占比重高，故给出 2 光子至 7 光子的光子数分辨系数，如表 2 所示。200 MHz 正弦门控抑制模式下的光子数分辨系数始终小于被动抑制模式下的光子数分辨系数，但随着光子数的增多，受限于器件自身条

件,导致门控模式下 PNR 探测的优势逐渐减弱。例如,被动抑制模式下 2 光子的光子数分辨系数为 0.709,与门控抑制模式下 2 光子的光子数分辨系数 0.633 相比,前者的光子数分辨系数大且相差 0.076。同样,被动抑制模式下 5 光子的光子数分辨系数 0.683 与门控抑制模式下 5 光子的光子数分辨系数 0.671 相比,后者光子数分辨系数更小。最后,被动抑制模式下 7 光子的光子数分辨系数 0.725 与门控抑制模式下 7 光子的光

子分辨系数 0.714 相比,门控抑制模式下的光子数分辨系数更小且相差 0.011。该评估结果表明,与被动抑制模式相比,工作在 200 MHz 门控抑制模式下基于 MPPC 的 PNR 探测系统,其光子数分辨能力得到了改善。表 2 中 $a_{2,3}$ 为 2 光子的光子数分辨系数, $a_{3,4}$ 为 3 光子的光子数分辨系数, $a_{4,5}$ 表示 4 光子的光子数分辨系数, $a_{5,6}$ 为 5 光子的光子数分辨系数, $a_{6,7}$ 为 6 光子的光子数分辨系数, $a_{7,8}$ 为 7 光子的光子数分辨系数。

表 2 不同工作模式下的光子数分辨系数

Tab. 2 Photon number resolution coefficients in different operating modes

工作模式	$a_{2,3}$	$a_{3,4}$	$a_{4,5}$	$a_{5,6}$	$a_{6,7}$	$a_{7,8}$
被动抑制	0.709	0.686	0.683	0.683	0.689	0.725
门控抑制	0.633	0.678	0.677	0.671	0.669	0.714

为了研究基于 MPPC 的高速 PNR 探测系统工作在 200 MHz 正弦门控抑制模式下的最大计数率,在激光重复频率为 40 MHz、探测效率为 30%、制冷温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,通过逐渐增大入射光强,得到的光子数分辨效果如图 6 所示。从整体来看,随着入射光强的增大,各光子高斯曲线的半高宽逐渐变大,且由于电脉冲信号中心幅值的分布不集中,导致光子间重叠面积增多,光子数分辨能力明显变差。并且,入射光强增大后,少光子概率减少而多光子概率增加,故图中的光子峰整体逐渐右移,该探测系统最高探测到每脉冲 6.8 光子时可有效分辨出 14 个光子。但是,由于激光器的光强有限,基于 MPPC 的 PNR 探测系统最大只能探测到每脉冲 6.8 光子,此时该 PNR 探测系统仍未达到饱和计数率,还有相当

多的上升空间。

3 结论

本文对基于 MPPC 的高速 PNR 探测特性进行了研究分析,此外,为了详细地研究 MPPC 光子数分辨效果,根据光子数分布特性引入了光子数分辨系数。在被动抑制模式下,研究了基于 MPPC 的 PNR 探测特性,所提出的光子数分辨系数能更精准地评估光子分辨效果的细微差异,并验证了随着光信号重复频率的增加,光子数分辨效果逐渐变差。与传统抑制模式不同,本文采用重复频率为 200 MHz 的正弦门控信号加载在 MPPC 上,极大地缩短了其探测的恢复时间,即死时间降低到几纳秒。同时,采用低通滤波法与自平衡差分法相结合的滤波技术,将容性尖峰噪声抑制到热噪声水平,抑制比大于 40 dB,实现了雪崩信号的有效提取。实验结果表明,当激光重复频率为 40 MHz 时,与被动抑制模式相比,200 MHz 正弦门控模式下的光子数分辨效果明显得到了改善。本文方法可满足高速光子数可分辨探测需求,可为高速 PNR 探测提供参考。

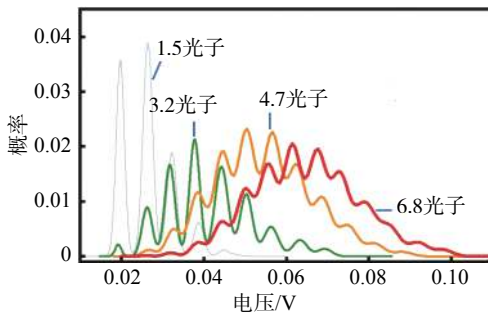


图 6 200 MHz 门控抑制模式下的光子数分辨效果图

Fig. 6 Photon number resolution in 200 MHz gated suppression mode

参考文献:

- [1] LIANG Y, ZENG H P. Single-photon detection and its

- applications[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2014, 57(7): 1218 – 1232.
- [2] GOMI S, HANO H, IJIMA T, et al. Development and study of the multi pixel photon counter[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, 581(1/2): 427 – 432.
- [3] 阎珍德. MPPC 简介及其性能测试 [J]. *电子测试*, 2018(15): 49 – 50.
- [4] ERAERDS P, LEGRÉ M, ROCHAS A, et al. SiPM for fast photon-counting and multiphoton detection[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14539 – 14549.
- [5] AKIBA M, INAGAKI K, TSUJINO K. Photon number resolving SiPM detector with 1 GHz count rate[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2779 – 2788.
- [6] LIANG Y, WU E, CHEN X L, et al. Low-timing-jitter single-photon detection using 1-GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(13): 887 – 889.
- [7] CHEN X L, WU E, XU L L, et al. Photon-number resolving performance of the InGaAs/InP avalanche photodiode with short gates[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131118.
- [8] 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.
- [9] SOTO O, ROJAS R, KULESHOV S, et al. Novel hamamatsu multi-pixel photon counter (MPPC) array studies for the gluex experiment: new results[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 739: 89 – 97.
- [10] Hamamatsu Photonics (China) Co., Ltd. MPPC [EB]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/19326/12377/type.html>.
- [11] BOLTRUCZYK G, BROSLAWSKI A, GOSK M, et al. Development of MPPC-based detectors for high count rate DT campaigns at JET[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2017, 123: 940 – 944.
- [12] 刘刚, 贾宏志, 涂建坤. 基于 SiPM 的高灵敏度大响应范围的弱光探测系统 [J]. *光学仪器*, 2019, 41(4): 69 – 73.
- [13] 陈忠祥, 武晓东, 吴云良, 等. SiPM 在脉冲光检测系统中的应用研究 [J]. *光学仪器*, 2014, 36(6): 476 – 480.

(编辑: 刘铁英)