

InGaAs/InP高速正弦门控单光子探测器后脉冲抑制方案

曹扬 苏扬 蒋连军 刘酩 郭舒扬 张文哲 方余强 高松 陈尊耀 陈治通 于林 唐世彪

Afterpulse suppression scheme of InGaAs/InP high speed sinusoidal gated single photon detector

Cao Yang, Su Yang, Jiang Lianjun, Liu Ming, Guo Shuyang, Zhang Wenzhe, Fang Yuqiang, Gao Song, Chen Zunyao, Chen Zhitong, Yu Lin, Tang Shibiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有限探测死时间的高速测量设备无关-量子密钥分配

High speed measurement device independent quantum key distribution with finite detector dead time

红外与激光工程. 2018, 47(S1): 55 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.S122001>

用于1 550 nm光子检测的InGaAs/InP 单光子雪崩二极管的温度相关性

Temperature dependency of InGaAs/InP single photon avalanche diode for 1 550 nm photons

红外与激光工程. 2021, 50(11): 20210453 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210453>

飞行中继平台的MDI-QKD应用性能

Performance of Measurement Device Independent Quantum Key Distribution on flight repeater platform

红外与激光工程. 2021, 50(11): 20210124 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210124>

硅单光子探测器研制及其在高精度星地时间比对中应用 (特邀)

Development of silicon single photon detector and its application in high-precision satellite-to-ground time comparison (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211004 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211004>

基于量子线路逻辑运算的单光子量子态测量方案

Single photon quantum state measurement scheme for quantum circuit logic operation

红外与激光工程. 2020, 49(2): 0205002 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0205002>

InP基自由运行模式单光子APD

InP-based free running mode single photon avalanche photodiode

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0103005 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0103005>

InGaAs/InP 高速正弦门控单光子探测器后脉冲抑制方案

曹 扬¹, 苏 扬¹, 蒋连军^{2*}, 刘 酩², 郭舒扬¹, 张文哲¹, 方余强², 高 松²,
陈尊耀², 陈治通², 于 林², 唐世彪²

1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510000;
2. 科大国盾量子技术股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 基于量子力学基本原理的量子密钥分发 (QKD) 系统具有信息论安全的水平, 单光子探测器是 QKD 系统的重要组成, 其后脉冲对 QKD 系统的安全成码率和安全成码距离均有重要影响。文中根据 InGaAs/InP 高速正弦门控探测器的后脉冲概率随时间呈现指数递减分布的规律, 提出了一种基于时间测量的后脉冲抑制方案, 采用“Start-Stop 型”时间间隔测量方式对探测脉冲进行测量, 通过对探测事件进行时间标记并舍弃一段时长内探测脉冲的方法降低了后脉冲概率。实际验证了某型号单光子探测器的后脉冲概率随舍弃时长的关系, 在 500 ns 舍弃时长条件下, 后脉冲概率 2.46%, 增加舍弃时长至 5 μ s 可降低后脉冲至 2% 以下。同时, 分析了 100 ns 舍弃时长条件下的典型探测脉冲计数分布, 指出了主要后脉冲分布区域以及未过甄别阈值的雪崩脉冲引起的后脉冲机理。进一步地, 指出基于时间测量方式区分探测脉冲的到达时间不仅可用于降低单光子探测的后脉冲概率, 还可以根据探测脉冲的到达时间识别雪崩过渡区攻击事件、门外攻击事件, 从而丢弃被攻击区域的探测脉冲来提升 QKD 系统抗量子黑客攻击的能力, 可支撑高速正弦门控单光子探测器应用于实用化的 QKD 系统。

关键词: 量子密钥分发; 正弦门控单光子探测器; 后脉冲概率; 时间测量

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230701

0 引言

单光子探测器是一种高灵敏的极弱光检测器, 可以达到单光子探测的极限, 能够对单个光子信号进行探测, 具有非常广泛的应用, 如量子通信、量子测量、宇宙学、暗物质探测等领域^[1-5]。单光子探测器也是 QKD 系统的关键技术, 常用 InGaAs/InP 材料的单光子雪崩光电二极管 (APD) 实现单光子探测, 因其体积小、易于制备、制冷成本低, 成为近年来研究的热点之一^[6-13], 也使得实用化 QKD 系统的安全成码距离得以不断拓展。InGaAs/InP 材料机理决定了其具有较高的后脉冲概率^[14-16], 而较高的后脉冲概率会使得 QKD 系统的错误率上升, 对 QKD 系统的安全成码率和安全成码距离均有重要影响, 严重时甚至不能安全成码。因此, 如何尽可能降低后脉冲概率对 QKD 系

统的影响是 InGaAs/InP 材料的单光子探测器要面临的一个重要问题。

后脉冲概率定义为一段时间内由前一个光子探测而产生的脉冲计数的概率。当雪崩发生时, 倍增区材料中的任何缺陷都可以成为载流子的捕获中心, 当雪崩被抑制后这些缺陷开始释放载流子, 被释放的载流子受到电场加速时会再次触发雪崩, 也就产生与前一次雪崩脉冲相关联的后脉冲。一个入射光子产生的雪崩脉冲可以触发一个或者几个初级后脉冲, 一个初级后脉冲可能产生一个或者多个次级后脉冲。目前的研究实验表明后脉冲概率具有随着时间延长而递减分布的规律^[17]。

常用的后脉冲概率抑制方法是采用门控方式缩短雪崩时间, 如自差分技术、高速门控技术。2015 年, 东芝公司针对 1 GHz 的正弦门控探测器采用自差

收稿日期: 2023-12-22; 修订日期: 2024-03-04

基金项目: 安徽省科技重大专项 (202103a13010004); 合肥市重大专项定向委托项目 (2021DX007)

作者简介: 曹扬, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事电力监控系统网络安全方面的研究。

通讯作者: 蒋连军, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事单光子探测器、量子通信方面的研究。

分技术抑制后脉冲,工作温度 -50°C 条件下,实现探测效率 55%、后脉冲概率 10.2%^[18]。2017 年,中国科学技术大学针对 1.25 GHz 正弦门控探测器研制了单片集成的雪崩读出电路芯片,降低了电路寄生参数抑制后脉冲,工作温度 -30°C 条件下,实现探测效率 27.5%、后脉冲概率为 6.1%^[19]。2020 年,中国科学技术大学进一步将 1.25 GHz 正弦门控探测器的探测效率提升至 60%、后脉冲 14.8%^[20]。

对于高速正弦门控探测器,其门控信号的产生方式决定了很难直接关闭正弦门控信号。文中根据高

速正弦门控探测器的后脉冲概率随时间呈现指数递减分布的规律,提出了一种基于时间测量的后脉冲抑制方案,通过对探测事件进行时间标记并舍弃一段时间内探测脉冲的方法来降低后脉冲概率,从而降低对 QKD 系统的影响。

1 方案设计

高速正弦门控探测器需要偏置电压和门控电压共同作用才能使得探测器正常工作,其工作原理如图 1 所示。

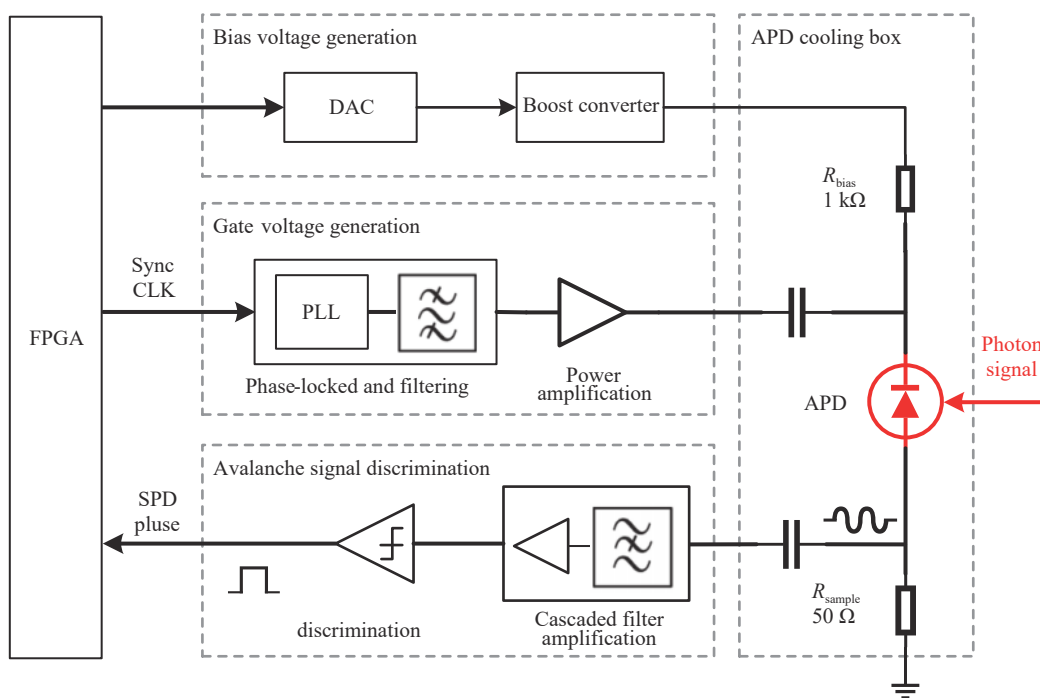


图 1 高速正弦门控型单光子探测器电路结构

Fig.1 Block diagram of high-speed sine gated single-photon detector

偏置电压产生电路生成反向偏置电压并加载到 APD 的阴极,偏置电压(约 60 V)略低于雪崩击穿电压;门控信号产生电路生成高速正弦门控信号并经交流耦合方式叠加在反向偏置电压之上作用到 APD 阴极。偏压信号和门控信号叠加使得 APD 两端的反向电压超过其雪崩击穿电压,APD 工作于盖革模式,可进行单光子探测。雪崩信号甄别电路抑制门控微分噪声信号并放大雪崩信号,经甄别后转换为数字信号脉冲。

由于后脉冲概率具有随着时间延长而递减分布

的规律,对每一个探测器事件进行时间标记。前一个探测脉冲到达后,舍弃后续一段时间内的探测脉冲,可以在不关闭门信号的情况下降低探测器的后脉冲概率。

基于探测事件时间测量的后脉冲抑制工作原理和时序方案如图 2 所示。

单光子探测器输出的探测脉冲经扇出单元分为两路,一路注入高精度时间测量单元(TDC)进行时间测量,TDC 标记该探测脉冲的到达时间信息,并记录为探测事件;另一路注入舍弃区域计时单元,作为计

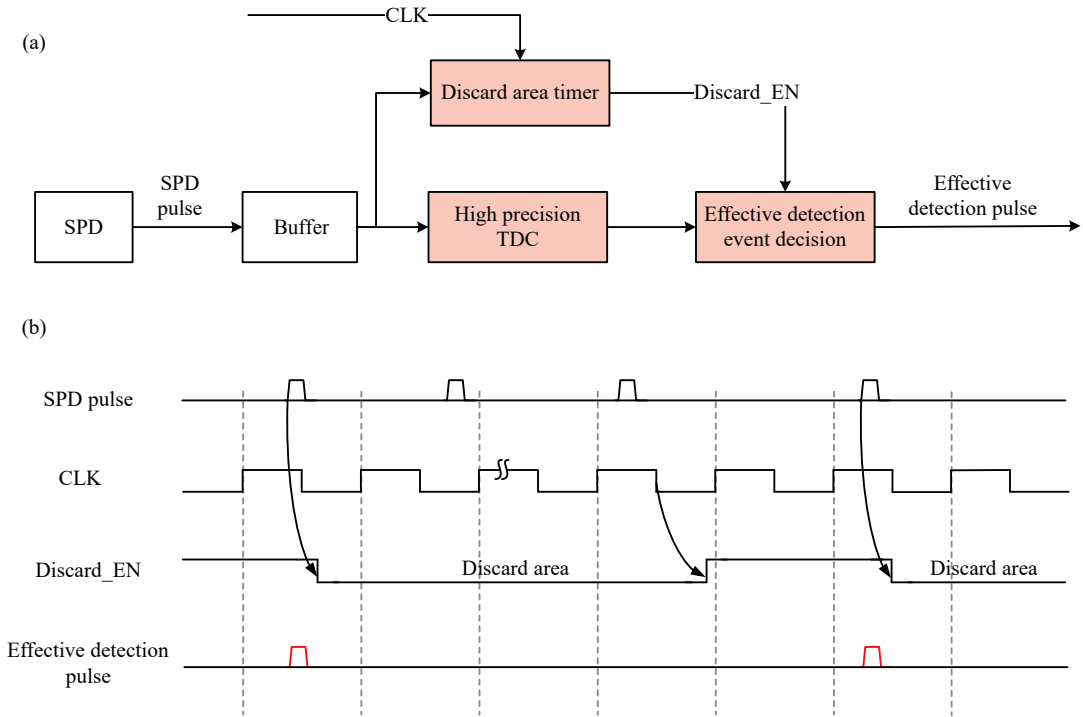


图 2 基于探测事件时间测量的后脉冲抑制方案。(a) 原理框图; (b) 时序图

Fig.2 Afterpulse suppression scheme based on detection event time measurement. (a) Block diagram; (b) Time sequence diagram

时启动信号; 舍弃区域计时单元在本地时钟 CLK 驱动下进行计时 (时长可通过 FPGA 设置), 计时时间内将 Discard_EN 输出信号置为无效状态 (即 Discard_EN=1), 计时结束时将 Discard_EN 输出信号置为有效状态 (即 Discard_EN=0)。有效探测事件判决单元接收带有时间信息标记的探测事件和 Discard_EN 信号, 通过判断 Discard_EN 信号是否有效来决定探测事件是否输出, 处于 Discard_EN 无效区的探测事件不输出, 处于 Discard_EN 有效区的探测事件输出。经过上述处理后, 就可以将大部分后脉冲数据舍弃掉, 从而达到降低探测器后脉冲的目标。

2 实验系统与结果讨论

以某商用单光子探测器为例, 正弦门控频率为 1.25 GHz, 探测效率 25%, 所设计后脉冲概率测量系统如图 3 所示。

脉冲光源接收信号发生器的低频周期驱动 (625 kHz) 产生低频信号光, 经可调光衰减器衰减至单光子水平 (每脉冲平均光子数 $\mu=0.1$) 注入被测单光子探测器。单光子探测器产生探测脉冲输出至 TDC 进行探测脉冲到达时间测量, 上位机 (PC) 读取

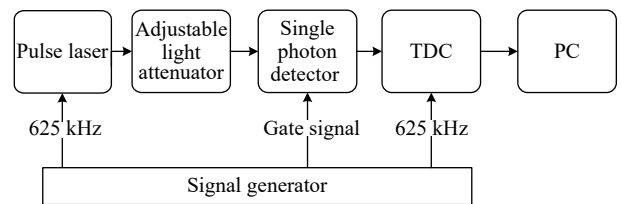


图 3 单光子探测器后脉冲测量系统框图

Fig.3 Block diagram of afterpulse measurement system for single-photon detector

TDC 数据并开展数据分析。采用“Start-Stop 型”时间间隔测量方式的 TDC 对探测信号进行测量 (时间分辨率 50 ps)。Start 信号连接和光信号驱动同源同频的周期信号 (625 kHz); Stop 信号连接探测脉冲, 由于探测效率和注入光子数限制, 探测脉冲是随机信号。通过 Start-Stop 信号的时间测量结果归一化可以找到探测脉冲的主峰位置, 探测脉冲时间测量结果归一化如图 4 所示。

探测脉冲时间测量结果经归一化后, 可以方便获取探测脉冲的计数分布, 探测脉冲计数分布 (舍弃时长为 100 ns) 如图 5 所示。横轴是归一化时间间隔 (单位是 50 ps, 最长是 1.6 μ s), 纵轴是单位时间内的探测脉冲计数。A 区域是光信号对应的主峰位置, B 区

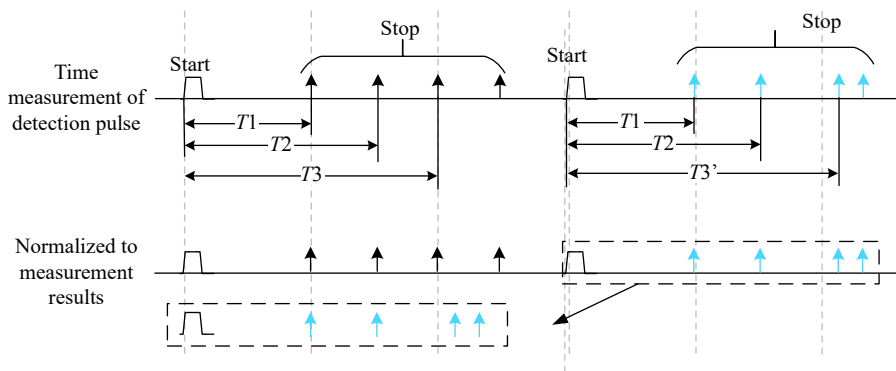


图 4 探测脉冲时间测量结果归一化

Fig.4 Normalization of time measurement results for detecting pulses

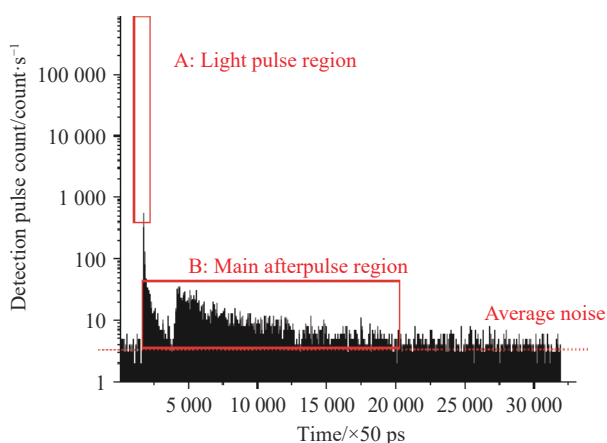


图 5 探测脉冲计数分布 (舍弃时长为 100 ns)

Fig.5 Detection pulse count distribution (the discard time is 100 ns)

域是主要的后脉冲区域;可以看出,后脉冲主要分布在光脉冲主峰后的 1 μs (横轴 20000) 时间内并且呈现指数下降分布,1 μs 之后的后脉冲计数接近暗计数水平。值得注意的是,在 B 区域中,光脉冲主峰后存在一定长度内 (等于舍弃时长) 探测计数凹陷区,并且凹陷区内的探测计数也呈现指数下降分布趋势。这是因为 APD 内部的雪崩信号的幅度是随机的,只有超

过甄别阈值的雪崩信号才被识别为探测脉冲。

凹陷区的脉冲计数产生机理如图 6 所示,主峰位置的部分光子虽然其雪崩信号幅度没有超过甄别阈值,但该雪崩信号同样会产生初级或者次级后脉冲,其后脉冲有可能会超过雪崩阈值而被识别为探测脉冲。因此,在归一化操作条件下,主峰位置未通过甄别阈值的雪崩脉冲所引发的后脉冲计数会显示在主峰之后的舍弃时长范围内,其计数值也呈现指数下降规律且很快接近暗计数水平。

根据探测脉冲计数分布情况可以计算出后脉冲概率 (P_{ap}),其计算如公式 (1) 所示:

$$P_{ap} = \frac{(R - R_{ph}) - R_d}{R_{ph}} \quad (1)$$

式中: P_{ap} 为后脉冲概率, R 为总探测计数,包含光信号计数和噪声计数; R_{ph} 为对应位置的光信号主峰计数; R_d 为暗计数。

单光子探测器不同舍弃时长的后脉冲概率变化如图 7 所示。

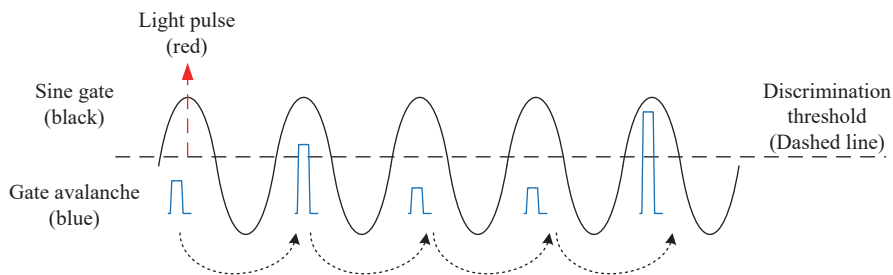


图 6 未超过甄别阈雪崩信号引发的后脉冲示意

Fig.6 Afterpulses triggered by avalanche signals that do not pass the discrimination threshold

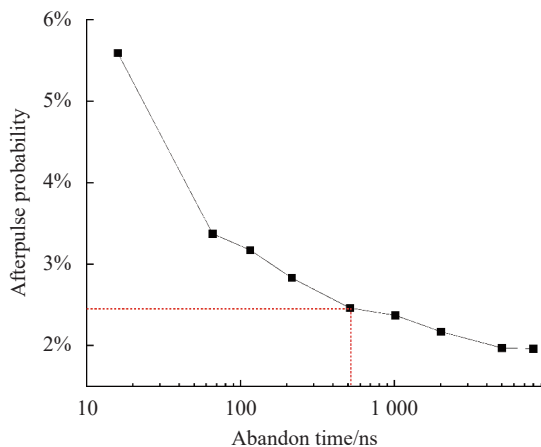


图 7 不同舍弃时长的单光子探测器后脉冲概率变化

Fig.7 Afterpulse probability changes with different discard times of single-photon detector

可以看出,有效探测事件之后的舍弃时长越长则后脉冲概率越低。当舍弃时长为 0 ns 时,后脉冲概率为 5.59%;当舍弃时长为 500 ns 时,后脉冲概率降低到 2.46%;当舍弃时长达到 5000 ns 时,后脉冲概率降低到 1.97%。一般来说,QKD 系统可容忍的错误率约为 3%~5%,后脉冲概率所引入的错误率约为后脉冲概率的一半,因此,当舍弃时长达到 500 ns 及以上时,后脉冲所引入的错误率处于 QKD 系统可容忍错误率范围内,可以满足 QKD 系统的使用要求。

更进一步地,对于门控型探测,基于时间测量方式区分探测脉冲的到达时间,不仅可用于降低单光子探测的后脉冲概率,还可以根据探测脉冲的到达时间识别雪崩过渡区攻击事件、门外攻击事件,从而丢弃被攻击区域的探测脉冲来提升 QKD 系统抗量子黑客攻击的能力。不同到达时间的探测脉冲示意如图 8 所示。

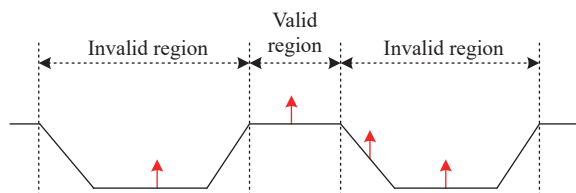


图 8 不同到达时间的探测脉冲示意

Fig.8 Detection pulses with different arrival times

门控型探测器的门内是有效探测区域时间窗口,其他区域(门外区域、雪崩过渡区)是无效探测时间

区域。根据探测脉冲到达时间进行探测事件有效性划分的工作流程:首先获取每个探测脉冲时间信息,然后根据处理策略判断该脉冲属于有效区域还是无效区域;当识别到处于有效区域的探测脉冲时,正常输出该探测脉冲;当识别到处于无效区域的探测脉冲时,产生告警信息进行并舍弃该脉冲,从而提高探测事件的输出质量。

3 结 论

文中根据高速正弦门控探测器的后脉冲概率随时间呈现指数递减分布的规律,提出了一种基于时间测量的后脉冲抑制方案,通过对探测事件进行时间标记并舍弃一段时长内探测脉冲的方法降低了后脉冲概率,从而降低对 QKD 系统的影响。在舍弃时长 500 ns 条件下,后脉冲概率低于 2.5%,且随着舍弃时长增加可进一步降低后脉冲至 2% 以下。值得注意的是,由于单光子探测器的多个指标是相互制约的,随着舍弃时长的增加探测器计数率损失也会增加。一般来说,舍弃时长小于无舍弃条件下的探测器计数倒数的 1/5 为适宜,可保证探测器有足够的计数能力而且计数损失较小。另外,未过甄别阈值的雪崩脉冲也会引发初级和次级后脉冲,雪崩信号的甄别阈值也是需要仔细考虑的因素。实际应用过程需根据不同的应用场景来平衡后脉冲概率、探测效率、暗计数率、饱和计数率等之间的关系,使得单光子探测器可以适配不同 QKD 系统需求。

文中提出的后脉冲概率抑制方案,具有原理清晰、易于工程实现的特点,不对正弦门控探测器工作过程产生直接影响,也可以达到较好的抑制后脉冲的效果。同时,该方案具有普适性特点,也可应用于矩形门控探测器、自由运行探测器等需要对后脉冲进一步抑制的场景,也不会对原有探测过程产生影响。进一步地,基于时间测量方式区分探测脉冲的到达时间也可以提升 QKD 系统抵御雪崩过渡区攻击、门外攻击等量子黑客攻击的能力。

参考文献:

[1] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3: 696-705.

- [2] Eisaman M D, Fan J, Migdall A, et al. Invited review article: Single-photon sources and detectors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(7): 071101.
- [3] Kameyama S, Yanagisawa T, Ando T, et al. Development of wind sensing coherent doppler lidar at mitsubishi electric corporation from late 1990s to 2013 [C]//Abstracts Int Coherent Laser Radar Conf, 2013.
- [4] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(5): e286.
- [5] Jiang Lianjun, Fang Yuqiang, Yu Chao, et al. Miniaturized free-running InGaAs/InP single-photon detector (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20230017. (in Chinese).
- [6] Zhang J, Eraerds P, Walenta N, et al. 2.23 GHz gating InGaAs/InP single-photon avalanche diode for quantum key distribution [C]//Advanced Photon Counting Techniques IV, SPIE, 2010, 7681: 239-246.
- [7] Itzler M A, Jiang X, Entwistle M, et al. Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(3-4): 174-200.
- [8] Lunghi T, Barreiro C, Guinnard O, et al. Free-running single-photon detection based on a negative feedback InGaAs APD [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(17): 1481-1488.
- [9] Yan Z, Hamel D R, Heinrichs A K, et al. An ultra low noise telecom wavelength free running single photon detector using negative feedback avalanche diode [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(7): 073105.
- [10] Yu C, Shangguan M, Xia H, et al. Fully integrated free-running InGaAs/InP single-photon detector for accurate lidar applications [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14611-14620.
- [11] Yu C, Qiu J, Xia H, et al. Compact and lightweight 1.5 μm lidar with a multi-mode fiber coupling free-running InGaAs/InP single-photon detector [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 6-14.
- [12] Zhang J, Thew R, Gautier J D, et al. Comprehensive characterization of InGaAsP-InP avalanche photodiodes at 1 550 nm with an active quenching ASIC [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2009, 45: 792-799.
- [13] Shi Yanli, Li Yunxue, Bai Rong, et al. Advancement of shortwave infrared single-photon detectors(invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220908. (in Chinese)
- [14] Jiang X, Itzler M A, Ben-Michael R, et al. Afterpulsing effects in free-running InGaAsP single-photon avalanche diodes [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 44(1): 3-11.
- [15] Cova S, Lacaíta A, Ripamonti G. Trapping phenomena in avalanche photodiodes on nanosecond scale [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1991, 12(12): 685-687.
- [16] Rarity J G, Wall T E, Ridley K D, et al. Single-photon counting for the 1 300–1 600 nm range by use of Peltier-cooled and passively quenched InGaAs avalanche photodiodes [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(36): 6746-6753.
- [17] Guo Zhihong, Xiao Liantuan. Photon statistical analyses for afterpulse probability [J]. *Shanxi Electronic Technology*, 2007(3): 3-4. (in Chinese)
- [18] Comandar L C, Fröhlich B, Dynes J F, et al. Gigahertz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1 550 nm [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(8): 083109.
- [19] Jiang W H, Liu J H, Liu Y, et al. 1.25 GHz sine wave gating InGaAs/InP single-photon detector with a monolithically integrated readout circuit [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5090-5093.
- [20] Fang Y Q, Chen W, Ao T H, et al. InGaAs/InP single-photon detectors with 60% detection efficiency at 1 550 nm [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(8): 083102.

Afterpulse suppression scheme of InGaAs/InP high speed sinusoidal gated single photon detector

Cao Yang¹, Su Yang¹, Jiang Lianjun^{2*}, Liu Ming², Guo Shuyang¹, Zhang Wenzhe¹, Fang Yuqiang², Gao Song², Chen Zunyao², Chen Zhitong², Yu Lin², Tang Shibiao²

(1. Power Dispatching and Control Center, China Southern Power Grid, Guangzhou 510000, China;

2. QuantumCTek Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract:

Objective Quantum key distribution (QKD) system based on the basic principles of quantum mechanics can reach the level of information theory security. Single photon detector is an important component of QKD system, and the afterpulse probability has an important effect on the performance of QKD system. In this paper, an InGaAs/InP high sinusoidal gated detector afterpulse suppression scheme is designed to meet the requirements of QKD system.

Methods In this paper, according to the law that the probability of the afterpulse of the InGaAs/InP high-speed sinusoidal gated detector shows an exponential decreasing distribution with time, the detection pulse is measured by using the "Start-Stop" time interval measurement method. Each detection pulse is time-marked separately, and the probability of the afterpulse of the detector is reduced by discarding the detection pulse within a certain period of time (Fig.2).

Results and Discussions This paper actually verifies the relationship between the afterpulse probability and the discard time of a single photon detector (Fig.5). The main afterpulse distribution area is pointed out and the reason for the depression in the range of discard time is explained (Fig.6). The afterpulse probability under different discard time conditions was calculated. The afterpulse probability is 2.46% when the discard time is 500 ns, and 1.97% when the discard time is 5 μ s. Furthermore, it is pointed out that distinguishing the arrival time of detection pulse by time measurement can also improve the ability of QKD system to resist quantum hacker attacks such as avalanche transition region attack and behind door attack.

Conclusions According to the law that the afterpulse probability of the InGaAs/InP high-speed sinusoidal gated detector is exponentially decreasing with time, a afterpulse suppression scheme based on time measurement is proposed in this paper. The afterpulse probability of the detector is reduced by marking the detection event with time and discarding the detection pulse in a period of time. The proposed afterpulse probability suppression scheme has the characteristics of clear principle and easy engineering implementation, and has no direct influence on the working process of single photon detector, but the detector saturation count rate will decrease with the increase of discard time. At the same time, distinguishing the arrival time of detection pulse by time measurement can also improve the ability of QKD system to resist quantum hacker attacks, and can support the application of high-speed sinusoidal gated single photon detector in QKD system.

Key words: quantum key distribution; sinusoidal gated single photon detector; afterpulse probability; time measurement

Funding projects: Major Scientific and Technological Special Project of Anhui Province (202103al3010004); Major Scientific and Technological Special Project of Hefei City (2021DX007)