

基于超短门控脉冲的GHz InGaAs/InP单光子探测

王泽云, 张怡萍, 梁 焰

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月18日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月29日

摘 要

本文基于InGaAs/InP雪崩光电二极管设计了1-GHz门控盖革模式单光子探测器。通过电容平衡技术与低通滤波相结合的方案实现了雪崩信号的有效提取, 并使探测器的重复频率可在较大范围内连续调节。此外, 超短门控脉冲被用于控制雪崩光电二极管的偏置电压, 进一步提高了探测器性能。最终实现的探测效率为11.0%, 暗计数率为 7.0×10^{-7} /门, 后脉冲概率为4.7%。该GHz单光子探测器的时间抖动测量值约为94 ps, 使其非常适用于高速量子密钥分发和激光测距系统。

关键词

单光子探测器, 雪崩光电二极管, 高速探测

GHz InGaAs/InP Single-Photon Detection with Ultrashort Gates

Zeyun Wang, Yiping Zhang, Yan Liang

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

Received: Apr. 18th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

A single-photon detector was demonstrated with InGaAs/InP avalanche photodiode operated in 1-GHz gated Geiger mode. The capacitance-balancing technique was combined with low-pass filtering to achieve the valid extraction of the avalanche signal. With this method, the repetition frequency of this detector could be continuously tuned on a large scale. Moreover, ultrashort gates were employed to control the bias voltage of the avalanche photodiode, further improving the performance

文章引用: 王泽云, 张怡萍, 梁焰. 基于超短门控脉冲的 GHz InGaAs/InP 单光子探测[J]. 物理化学进展, 2025, 14(2): 363-369. DOI: 10.12677/japc.2025.142034

of the detector. Detection efficiency of 11.0% was finally attained with dark count rate of 7.0×10^{-7} /gate and afterpulse probability of 4.7%. Besides that, the timing jitter of this GHz single-photon detector was measured to be ~ 94 ps, making it quite suitable for high-speed quantum key distribution and laser ranging systems.

Keywords

Single-Photon Detector, Avalanche Photodiode, High-Speed Detection

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

单光子探测器 (SPDs) 已被应用于许多重要领域, 如量子密钥分发 (QKD)、光时域反射测量、深空通信和生物成像[1]-[5]。凭借其小巧的结构和低功耗的优势, InGaAs/InP 雪崩光电二极管 (InGaAs/InP APD) 被广泛应用于近红外单光子探测[6]-[8]。影响 InGaAs/InP APD 的主要因素是误计数, 包括后脉冲和暗计数, 其中 InGaAs/InP APD 性能的主要限制是后脉冲效应。暗计数率 (DCR) 是单光子探测器在无光照条件下产生的误计数, 用于表征探测器系统的噪声性能。在实际测量中, 我们通过屏蔽入射光源, 记录此时 APD 产生的计数就是暗计数。APD 所产生的暗计数有三种主要来源: 热生载流子、带间隧穿 (BBT) 和陷阱辅助隧穿 (TAT), 其中热生载流子在低温操作条件下仍是主要贡献因素, 通常主要通过冷却 APD 来降低暗计数率, 本文章通过制冷模块将 APD 制冷至 -30°C 。后脉冲 (Afterpulse) 是由材料缺陷而产生的误计数。在 APD 雪崩期间, 流经二极管的电流会填充倍增区中的一些深能级陷阱。这些被捕获的载流子在经过缺陷寿命后被释放出来。如果这些被释放的载流子在随后的探测门期间被释放, 它们将导致额外的计数, 这类计数被称为后脉冲, 光子诱导的雪崩与后脉冲呈时间上的先后关系。载流子从陷阱释放的速率与被占据陷阱的数量成正比, 最初释放的后脉冲来自浅能级陷阱, 他们的数量最多。随后释放的为深能级陷阱的被困载流子, 数量相对更少, 后脉冲的数量于是会随着时间的衰减。这种效应限制了 InGaAs/InP APD 的实用性和性能, 因为它不仅减少了光子计数, 还增加了误计数。通常会引入数十到数百纳秒的死时间来抑制部分后脉冲, 但这会导致探测效率和最大计数率的降低。不同于暗计数的形成机制和均匀分布, 后脉冲主要体现为被捕获载流子释放产生的时间相关误计数, 在时间上不是随机分布。而且后脉冲效应还与工作温度和偏置电压有关, 在高增益的工作条件下尤为明显, 这使得后脉冲会产生比暗计数更多的误计数从而影响探测效率。在保持高探测效率的同时抑制后脉冲成为目前的研究热点。

InGaAs/InP APD 通常在门控盖革模式下工作以减少误计数。然而, 由于 APD 的电容特性, 门控脉冲会导致 APD 内部结电容充放电, 从而产生尖峰噪声。因此, InGaAs/InP APD 门控单光子探测的关键技术在于有效地从尖峰噪声中提取雪崩信号[9]。随着门控重复频率的增加, 雪崩时间缩短, 导致雪崩信号幅度减小, 进一步增加了信号提取的难度。迄今为止, 已有多种技术被提出用于实现基于 InGaAs/InP APDs 的 GHz 单光子探测, 如自差分、正弦波门控以及谐波抑制等[10]-[16]。通过这些技术, 尖峰噪声可被抑制至热噪声水平。在参考文献[16]中, 室温下 InGaAs/InP APD 单光子探测器集成了自差分电路, 获得了 25% 的探测效率和暗计数率为 5.9×10^{-5} /门, 后脉冲概率为 2.8%。然而, 考虑到使用自差分技术和正弦波门控技术时, 探测器的工作重复频率被限制在固定预设值, 降低了其实用性。基于此本文报道了一种基于 InGaAs/InP APD 的高速门控 SPD。采用 1-GHz 超短门控脉冲控制 APD 的偏置电压, 同时结合电容平

衡技术和低通滤波抑制尖峰噪声。尖峰噪声首先通过二极管模拟的输出进行差分抵消, 然后通过低通滤波器滤除至热噪声水平。通过这种方法, 尖峰噪声的抑制比可超过 30 dB, 有效地实现了雪崩信号的提取。此外, 门控重复频率可在较大范围内连续调节。当 APD 通过帕尔贴原理制冷至 -30°C 时, 我们实现了 11.0% 的探测效率, 暗计数率为 $7.0 \times 10^{-7}/\text{门}$, 时间抖动为 94 ps, 展示了该 SPD 的优异性能。

2. 实验装置

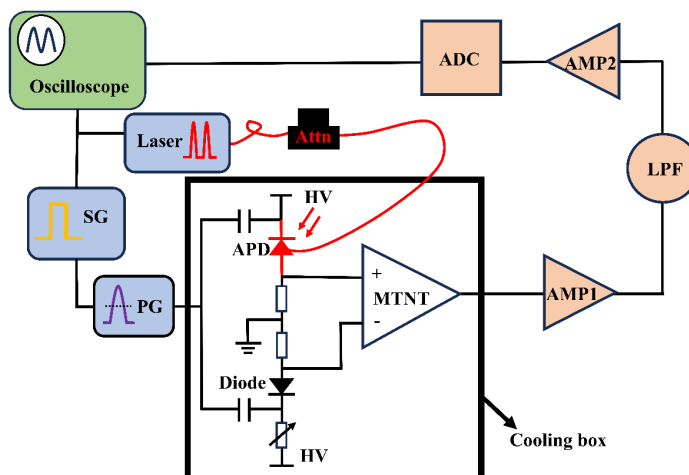


Figure 1. Schematic setup of the InGaAs/InP APD based single-photon detector. SG: Signal generator; PG: Pulse generator; Attn: Variable optical attenuator; AMP1, 2: RF amplifier 1, 2; LPF: Low-pass filter; MTNT: So-called magic-T network consisting of a broadband transformer; ADC: Analog to digital converter

图 1. 基于 InGaAs/InP APD 的单光子探测器原理图。SG: 信号发生器; PG: 脉冲发生器; Attn: 可变光衰减器; AMP: 射频放大器; LPF: 低通滤波器; MTNT: 魔 T 网络, 由宽带变压器组成; ADC: 模数转换器

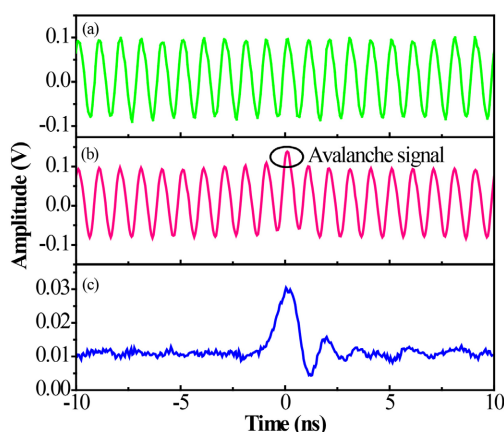


Figure 2. Waveforms of the output signal of AMP1 while the incident laser was (a) off and (b) on, respectively; (c) Waveform of the output signal of LPF

图 2. 入射激光分别(a)关闭和(b)开启时 AMP1 输出信号的波形; (c) LPF 输出信号的波形

基于 InGaAs/InP APD 的单光子探测器原理图如图 1 所示。所使用的 InGaAs/InP APD 有效光学直径为 $25 \mu\text{m}$, 型号为 PGA-300-1 (Princeton Lightwave)。我们使用 1-GHz 超短脉冲与直流电压耦合对 APD 进行偏置, 使其工作在门控盖革模式。APD 与一个二极管并联, 该二极管产生模拟 APD 的尖峰信号。APD 和二极管的输出信号分别连接到魔 T 网络(MTNT)的 0 和 π 输入端。由于 APD 和二极管的两个尖峰信号相互抵消, 因此可获得差分信号。为了使 APD 和二极管之间达到良好匹配, 我们调整施加在二极管电压

以改变其电容特性。考虑到本文中的 SPD 使用的超短门控信号, APD 的快速充放电会导致尖峰噪声相应增加同时雪崩时间减少, 同时雪崩时间窗口缩短, 使得雪崩信号减弱。这增加了光子诱导雪崩信号有效提取的难度, 在 MTNT 输出端使用了一个增益为 20 dB 的射频放大器(AMP)。图 2(a~b)展示了入射激光关闭和开启时 AMP1 的输出信号。尖峰噪声的峰峰值约为 200 mV, 而雪崩信号仅约为 30 mV 叠加在尖峰噪声上, 表明需要进一步提高尖峰噪声的抑制比。

我们分析了尖峰噪声的频率分布, 发现其主要集中在 1 GHz 及其谐波频率上。因此, 在 AMP1 后连接了一个截止频率为 700 MHz 的低通滤波器(LPF)。由于在 1 GHz 处的衰减比高于 40 dB, 尖峰噪声被抑制至热噪声水平, 雪崩信号可以被轻易获取, 如图 2(c)所示。在信号送入模数转换器模块之前, 使用另一个射频放大器(AMP 2)放大雪崩信号。电容平衡技术凭借其出色的尖峰噪声抑制性能(抑制比达 20 dB)和结构紧凑的特点, 已成为 MHz 级单光子探测系统中不可或缺的关键技术。电容平衡电路不仅简化了系统设计, 还大幅降低了实现成本, 使其在实际应用中得到了广泛的应用。该技术非常适合具有连续可调工作重复频率的 SPD, 然而其限制因素是原理图中 MTNT 的频率响应。对于本文提出的组合方案, 级联低通滤波器不仅可以使 SPD 的频率提高到 1 GHz 以上, 还可以保持 SPD 在较低频率下的性能。在这个方案中, 电容平衡技术与低通滤波技术相结合, 实现了对尖峰噪声的有效抑制。此外, 通过这种组合方法, 我们可以在不更换任何组件的情况下将重复频率从 MHz 连续调整到 GHz。

InGaAs/InP APD 通过制冷至 -30°C 以有效减少暗计数。为了表征探测器性能, 使用了一个 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波长、脉冲宽度为 35 ps 的光纤耦合脉冲激光二极管(PicoQuant GmbH, PDL 800-B)作为光子源照射 APD。光子源以门控频率的 1/100 同步触发, 并衰减至平均每脉冲包含 0.1 个光子。激光脉冲与门控脉冲之间的延迟被调整以获得最高探测效率。1-GHz 超短门控脉冲具有固定幅度 8.8 V 和半高宽(FWHM) 300 ps, 确保 APD 偏置电压能够在过偏压状态与非过偏压状态之间实现快速精确的切换。我们改变施加在 APD 上的直流电压以获得不同的探测效率, 并表征 SPD 的性能。图 2(c)显示雪崩信号后存在约 5 ns 的振荡。因此, 我们将该 SPD 的死区时间设置为 10 ns, 有效减少了振荡引起的错误计数。同时, 由于后脉冲主要在雪崩信号产生后产生, 后脉冲也会大幅减少。SPD 的输出波形由示波器(Agilent, DSO9404A)记录, 后脉冲概率可通过以下公式计算:

$$P_A = \frac{(I_{NI} - I_D)}{I_{ph} - I_{NI}} R$$

其中 I_{ph} 和 I_{NI} 分别是有光照射门和无光照射门的每门计数率, I_D 是每门的暗计数率, R 是门控脉冲重复频率与激光脉冲重复频率的比值。在我们的测量中, 取 $R = 100$ 。通常使用 P_d 来表征探测器的噪声, 公式如下:

$$P_d = \frac{C_{dcr}}{f_{gate}}$$

C_{dcr} 为暗计数率, f_{gate} 为门控频率。探测效率(PDE)是表征单光子探测器最基本也最重要的性能指标, 定义为探测器成功探测到入射光子的概率。在实际测量中, 考虑到我们使用的激光源是相干光源, 其光子数分布遵循泊松统计特性, 我们通常采用以下方法计算 PDE:

$$\text{PDE} = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{1 - P_d}{1 - C_{ig}/f_{laser}} \right)$$

μ 为平均光子数, f_{laser} 为入射激光的重复频率, C_{ig} 为有光照射门控内的计数率。如图 3 所示, 后脉冲概率和暗计数率随探测效率增加而增加。当探测效率调整为约 11.0%时, 暗计数率计算为 7.0×10^{-7} /门,

后脉冲概率为 4.7%。当探测效率增加到 20% 时, 暗计数率仅为 1.8×10^{-6} /门, 表明超短门控 InGaAs/InP SPD 的性能优异。本文使用电容平衡和低通滤波的组合方案有效地消除了尖峰噪声, 实现抑制比高于 30 dB, 保证了 SPD 的良好特性。另一方面, 这种采用组合技术的 SPD 结构简单可靠, 非常适合实际应用。

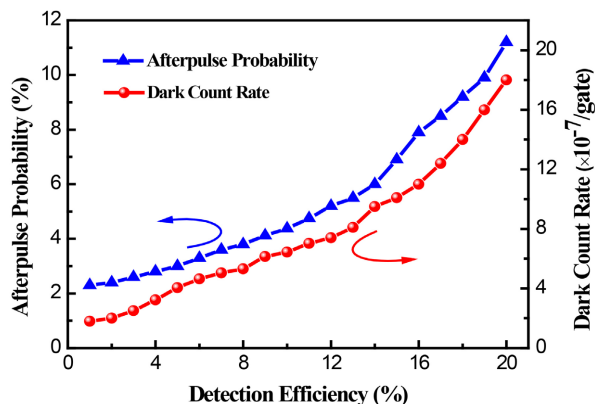


Figure 3. Afterpulse probability and dark count rate as a function of the detection efficiency of the SPD

图 3. SPD 的后脉冲概率和暗计数率随探测效率的变化关系

3. 结果与讨论

通过图 3 我们可以得出结论, 与正弦波门控 InGaAs/In APD 相比, 由于使用了超短门控信号, 该 SPD 的性能得到了提高。超短门控具有更短的脉冲宽度, 减少了 APD 偏置电压高于击穿电压的时间, 暗计数和后脉冲概率也会相应减少。然而, 随着雪崩时间的缩短, 雪崩信号的幅度会减小。考虑到方案中尖峰噪声的高抑制比, 可以获得极弱的雪崩信号, 确保了探测器的探测效率。此外, 我们记录了 SPD 的计数率, 同时扫描了光生计数与超短门控之间的延迟, 以测量施加在 APD 上的有效门宽。直流偏置电压固定以维持 10% 的最大探测效率, 记录的计数率也已归一化。如图 4 所示, 有效门宽测量值为 170 ps, 远短于正弦波门控的典型值。这一特性不仅提高了时间分辨率, 还为系统优化提供了更大空间。我们的组合方案允许同时调节超短门控的幅度和脉冲宽度两个关键参数, 为进一步提升单光子探测器性能提供了可能。相比于传统正弦波门控方案受限于其固有特性, 仅能调节脉冲幅度这一单一参数。我们的方案为 1 GHz 以上的 SPD 性能提供了更为灵活的调节范围。

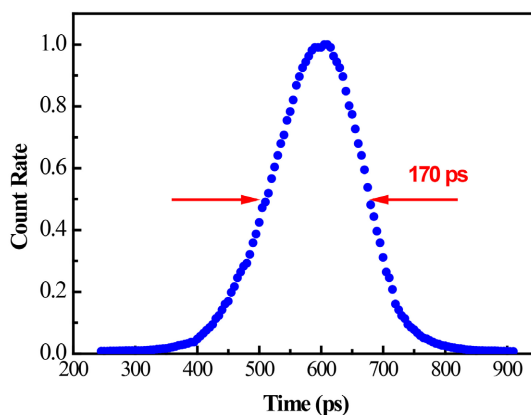


Figure 4. Count rate dependent on the laser pulse delay

图 4. 计数率与激光脉冲延迟的关系

时间抖动是高速单光子探测的另一个参数。我们采用了时间相关单光子计数系统(TCSPC, PicoQuant, HydraHarp 400)进行数据采集, 分辨率设置为 2 ps。图 5 展示了探测效率调整为约 10%时的探测事件时间直方图。由于激光以门控频率的 1/100 进行触发, 有光门计数峰远高于其它峰值。对应 1 GHz 的门控重复频率, 峰与峰之间间隔约为 1 ns。有光门计数峰后的残余计数由探测器雪崩信号的 5 ns 振荡和后脉冲共同组成, 通过引入 10 ns 死时间可部分抑制这些误计数, 从而进一步减少系统误差。最终, 时间抖动测量值约为 94 ps, 最终, 如图 5 里的插图所示, 我们的探测器实现了 94 ps 的时间抖动水平。

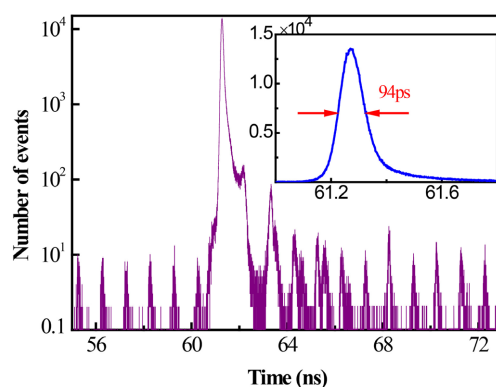


Figure 5. Time histogram of detection events, the inset shows the zoomed waveform of the peak histogram

图 5. 探测事件的时间直方图; 插图显示峰值直方图的放大波形

4. 结论

我们设计了一种基于电容平衡和低通滤波的组合技术的超短门控 InGaAs/InP APD 的高速单光子探测器, 在 1 GHz 超短门控下实现了尖峰噪声超过 30 dB 的抑制比, 获得了有效的光子诱导的雪崩信号。此外, 这种组合方案使得 SPD 可以在大范围内连续改变重复频率。当 1-GHz 超短门控(有效门宽约 170 ps)施加在 APD 上时, 最终实现 11.0%的探测效率, 暗计数率为 7.0×10^{-7} /门, 后脉冲概率为 4.7%。时间抖动测量值为 94 ps, 展示了高速应用的优异性能。在这种单光子探测方案中, 超短门控被用于快速切换 APD 的偏置电压在过偏压和非过偏压之间, 我们可以改变超短门控的幅度和脉冲宽度以进一步提高该 SPD 的性能, 使其适用于更广泛的领域。

参考文献

- [1] Korzh, B., Lim, C.C.W., Houlmann, R., Gisin, N., Li, M.J., Nolan, D., *et al.* (2015) Provably Secure and Practical Quantum Key Distribution over 307 km of Optical Fibre. *Nature Photonics*, **9**, 163-168. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.327>
- [2] Tang, Y., Yin, H., Chen, S., Liu, Y., Zhang, W., Jiang, X., *et al.* (2015) Publisher's Note: Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution over 200 km [Phys. Rev. Lett. 113, 190501 (2014)]. *Physical Review Letters*, **114**, Article ID: 069901. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.114.069901>
- [3] Wang, S., Yin, Z.Q., Chen, W., He, D.Y., Song, X.T., Li, H.W., Zhang, L.J., Zhou, Z., Guo, G.C. and Han, Z.F. (2015) Experimental Demonstration of a Quantum Key Distribution without Signal Disturbance Monitoring. *Nature Photonics*, **9**, 832-836.
- [4] Buller, G. and Wallace, A. (2007) Ranging and Three-Dimensional Imaging Using Time-Correlated Single-Photon Counting and Point-by-Point Acquisition. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **13**, 1006-1015. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2007.902850>
- [5] Al-Rawhani, M.A., Beeley, J. and Cumming, D.R.S. (2015) Wireless Fluorescence Capsule for Endoscopy Using Single Photon-Based Detection. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 18591. <https://doi.org/10.1038/srep18591>
- [6] Tosi, A., Acerbi, F., Anti, M. and Zappa, F. (2012) InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Diode with Reduced After-

- pulsing and Sharp Timing Response with 30 ps Tail. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **48**, 1227-1232. <https://doi.org/10.1109/jqe.2012.2208097>
- [7] Ma, H.Q., Yang, J.H., Wei, K.J., Li, R.X. and Zhu, W. (2014) Afterpulsing Characteristics of InGaAs/InP Single Photon Avalanche Diodes. *Chinese Physics B*, **23**, 66-70.
- [8] Li, Z.H., Bao, Z.Y., Shi, Y.F., Feng, B.C., Wu, E., Wu, G. and Zeng, H.P. (2015) Photon-Counting Chirped Amplitude Modulation Lidar with 1.5-GHz Gated InGaAs/InP APD. *IEEE Photonics Technology Letters*, **27**, 616-619.
- [9] Liu, Y., *et al.* (2010) Internal Cancellation of Spikes Using Two Avalanche Photodiodes in Series for Single Photon Detection. *Chinese Physics B*, **19**, Article ID: 080308. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/19/8/080308>
- [10] Namekata, N., Adachi, S. and Inoue, S. (2009) 15 GHz Single-Photon Detection at Telecommunication Wavelengths Using Sinusoidally Gated InGaAs/InP Avalanche Photodiode. *Optics Express*, **17**, 6275-6282. <https://doi.org/10.1364/oe.17.006275>
- [11] Liu, C., Ye, H. and Shi, Y. (2022) Advances in Near-Infrared Avalanche Diode Single-Photon Detectors. *Chip*, **1**, Article ID: 100005. <https://doi.org/10.1016/j.chip.2022.100005>
- [12] Zhang, J., Thew, R., Barreiro, C. and Zbinden, H. (2009) Practical Fast Gate Rate InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Photodiodes. *Applied Physics Letters*, **95**, Article ID: 091103.
- [13] Dello Russo, S., Elefante, A., Dequal, D., Pallotti, D.K., Santamaria Amato, L., Sgobba, F., *et al.* (2022) Advances in Mid-Infrared Single-Photon Detection. *Photonics*, **9**, Article No. 470. <https://doi.org/10.3390/photonics9070470>
- [14] Walenta, N., Lunghi, T., Guinnard, O., Houlmann, R., Zbinden, H. and Gisin, N. (2012) Sine Gating Detector with Simple Filtering for Low-Noise Infra-Red Single Photon Detection at Room Temperature. *Journal of Applied Physics*, **112**, Article ID: 063106. <https://doi.org/10.1063/1.4749802>
- [15] Zhu, G., Zheng, F., Wang, C., Sun, Z., Zhai, G. and Zhao, Q. (2016) Bias-Dependent Timing Jitter of 1-GHz Sinusoidally Gated InGaAs/InP Avalanche Photodiode. *Chinese Physics B*, **25**, Article ID: 118505. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/25/11/118505>
- [16] Comandar, L.C., Fröhlich, B., Lucamarini, M., Patel, K.A., Sharpe, A.W., Dynes, J.F., *et al.* (2014) Room Temperature Single-Photon Detectors for High Bit Rate Quantum Key Distribution. *Applied Physics Letters*, **104**, Article ID: 021101. <https://doi.org/10.1063/1.4855515>