

# 基于 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究

黄建华 吴 光 曾和平

(华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要** 提出了一种高速门控盖格模式的铟镓砷/铟磷雪崩光电二极管(InGaAs/InP APD)单光子探测技术。将 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲加载到 InGaAs/InP APD 上, 盖革模式下的光生雪崩信号埋藏在短脉冲充放电形成的噪声中, 采用 700 MHz 低通滤波器实现了 50.6 dB 的噪声抑制比, 有效地提取出了雪崩信号。通过半导体制冷, 使 InGaAs/InP APD 工作在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 1.5 GHz 短脉冲驱动下的 InGaAs/InP APD 在 1550 nm 的探测效率为 35%, 暗计数率为每门  $6.4 \times 10^{-5}$ , 超过了单纯使用 1.5 GHz 正弦门的探测性能, 而且在 15% 的探测效率下, 2.7 ns 后发生后脉冲的概率仅为每门  $6.0 \times 10^{-5}$ 。

**关键词** 探测器; 单光子探测; 铟镓砷/铟磷雪崩光电二极管

中图分类号 TN215 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0204001

## Study of 1.5 GHz Harmonics Ultrashort Pulse Gated InGaAs/InP Avalanche Photodiode Single-Photon Detection

Huang Jianhua Wu Guang Zeng Heping

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract** A high-speed single-photon detection technique based on gated InGaAs/InP avalanche photodiode (APD) is proposed. The 1.5 GHz harmonics ultrashort pulse is applied to an InGaAs/InP APD, and the photo-excited avalanche signal is buried in the harmonics noise due to the capacitive response of APD. By utilizing a 700 MHz low-pass filter, we achieve 50.6 dB noise suppression and extract the avalanche signal efficiently. With the InGaAs/InP APD operated under  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  by thermal electrical cooler, and driven by 1.5 GHz harmonics ultrashort pulse gating, a detection efficiency of 35% at 1550 nm with the dark count probability of  $6.4 \times 10^{-5}$  per gate is obtained, and the afterpulse probability is  $6.0 \times 10^{-5}$  per gate after 2.7 ns at the detection efficiency of 15%.

**Key words** detectors; single-photon detection; InGaAs/InP APD

**OCIS codes** 040.1345; 040.3060; 040.3780

## 1 引 言

铟镓砷/铟磷雪崩光电二极管(InGaAs/InP APD)是目前在 950~1650 nm 波段最常用的单光子探测器件<sup>[1-6]</sup>, 基于 InGaAs/InP APD 的单光子探测被广泛用于量子通信<sup>[7-9]</sup>、激光测距<sup>[10-11]</sup>、三维成像<sup>[12]</sup>和超灵敏光谱测量<sup>[13]</sup>等诸多弱光探测的

研究领域。但是由于半导体材料缺陷在雪崩过程中捕获载流子, 然后再次释放触发伪雪崩信号, 产生“后脉冲”误计数<sup>[1]</sup>, 通常后脉冲效应持续时间达到微秒量级, 而且后脉冲效应在 InGaAs/InP APD 中非常严重, 因此, 通常将 InGaAs/InP APD 工作在门控盖格模式下, 通过门信号使 APD 快速进入和

收稿日期: 2013-09-06; 收到修改稿日期: 2013-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(61127014, 11374105)

作者简介: 黄建华(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事单光子探测及其应用方面的研究。

E-mail: 51112000005@ecnu.cn

导师简介: 吴 光(1979—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事单光子探测及其应用方面的研究。

E-mail: gwu@phy.ecnu.edu.cn

离开盖格模式来减小后脉冲效应。基于门控盖格模式 InGaAs/InP APD 单光子探测的重复频率、探测效率、误计数和时间特性等参数决定了量子通信的通信距离、通信速率、成码速率和误码率<sup>[7-9]</sup>,以及超灵敏光谱测量和远距离激光测距系统的测量灵敏度和测量精度<sup>[10-11,13]</sup>。为此,近年来 InGaAs/InP APD 单光子探测一直朝着低噪声、高效率和高速率探测的方向发展,特别是亚纳秒量级的自差分方案和正弦门方案的提出<sup>[2-5]</sup>,一举将 InGaAs/InP APD 的探测速率提高到吉赫兹量级,达到准连续的高性能探测水平,为实用化的近红外单光子探测器发展铺平了道路。

加载在 InGaAs/InP APD 的周期门控脉冲信号经 APD 的结电容充放电,产生尖峰噪声,将雪崩信号淹没,随着门控脉冲重复频率的增大,脉冲宽度减小,雪崩信号的幅度也随之降低,必须有效地抑制尖峰噪声才能提取微弱的雪崩信号。自差分平衡技术<sup>[2-3]</sup>通过将 APD 的响应输出信号分成完全相同的两路,其中一路延时一个周期后与另一路做差分相减,可以实现 32 dB 的尖峰噪声抑制比,采用自差分方案实现了 1.25 GHz 门控重复频率的高速单光子探测,并且自差分技术适用于任意波形的门控脉冲驱动 APD。但是采用自差分方案要想获得最佳的噪声抑制比,必须精确地控制延时和信号衰减,而且该方案最大的缺点是一旦门控重复频率变更后,须重新调节延时和衰减得到一定的信噪比来提取微弱雪崩信号。正弦门探测技术<sup>[4-5]</sup>是由单一频率的正弦波驱动 APD,APD 响应后的雪崩信号频谱主要分布在基波频率以下,采用带阻滤波器或低通滤波器滤除高次谐波噪声,即可实现雪崩信号的有效检测。但是,正弦门方案不同于门控脉冲信号,无法提供更快的上升沿和可调的探测占空比,并且滤波技术会改变雪崩信号的波形。基于正弦门方案和自差分方案的共同优点,提出的基于 InGaAs/InP APD 的谐波差技术在 1310 nm 波段实现了 1.25 GHz 门控重复频率下 50% 探测效率和每门  $3.5 \times 10^{-3}$  后脉冲概率的单光子探测<sup>[6]</sup>,其中门控短脉冲信号由 1.25 GHz 和 2.5 GHz 的正弦波叠加合成,通过精确调节 1~3 次高次谐波的幅度和相位与 APD 的响应信号做差分,实现了 65 dB 的噪声抑制比,最后由 4 GHz 的低通滤波器提取出高信噪比的雪崩信号。这种谐波差方案极大地抑制了 APD 的噪声,减小了雪崩载流子和后脉冲,保留了雪崩信号的完整性,但是不可避免的是,这一技术仍然需要精确地控制

高次谐波的延时和幅度,为此提出了高重复频率的高次谐波低通滤波技术。

本文将 1.5 GHz 超短脉冲经过 1 GHz 高通滤波器后得到 1、2、3、4 次谐波,将峰谷值为 7 V 的多次谐波超短脉冲加载到 InGaAs/InP APD,APD 探测到光子后的输出信号包含高次谐波噪声和光生雪崩信号,而雪崩信号的频谱集中在基频之下并且淹没在高频噪声里,因此经过 700 MHz 的低通滤波器滤除高频噪声后,实现了 50.6 dB 的噪声抑制比,可以有效地提取和鉴别雪崩信号。

## 2 实验方案

基于 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP APD 单光子探测原理如图 1(a)所示,1.5 GHz 超短脉冲信号经过 1 GHz 高通滤波器 (HPF) 滤除低频成份后与直流 (DC) 高压偏置耦合到 APD 的阴极,其中 1 GHz 高通滤波器的工作频率为 1~6 GHz,在小于 800 MHz 频率时的抑制比大于 35 dB,APD 工作在热电制冷的恒温盒内,光子经过  $62.5 \mu\text{m}$  的多模光纤照射到光敏面上,APD 吸收光子在门控盖格模式下触发雪崩形成光生雪崩电流,并由  $50 \Omega$  取样电阻提取出来,同时加载在 APD 上的脉冲信号产生充放电噪声,将雪崩信号淹没。雪崩信号的频谱主要分布在门控重复频率的基频以下,因此经过 700 MHz 低通滤波器 (LPF) 滤除高频噪声,其中该低通滤波器在大于 1 GHz 频率时抑制比大于 40 dB,采用这一低通滤波技术,实现了 50.6 dB 的短脉冲充放电噪声抑制比,微弱信号再经射频 (RF) 放大输出即可实现雪崩信号的鉴别探测。图 1(b) 为 1.5 GHz 短脉冲信号经 1 GHz 高通滤波器后的频谱图,可以看出短脉冲的频谱主要为 1.5、3、4.5、6 GHz 的多次谐波成份,因为高通滤波器的工作频率为 1~6 GHz,所以 1.5 GHz 的短脉冲信号经高通滤波后只保留了其四次谐波成份。图 1(c) 为高通滤波后加载到 APD 阴极上的 1.5 GHz 脉冲波形和滤波放大提取出的雪崩信号波形,可以看出短脉冲的周期约为 670 ps、峰谷值约为 7 V、脉冲持续时间约为 220 ps,本文中的 InGaAs/InP APD 探测性能测试都是基于此门控短脉冲完成。负向雪崩信号波形是在 1550 nm 的光子照射下,由数字示波器采集得到的,可以看出噪声幅度在 20 mV 左右,雪崩幅度约为 130 mV,信噪比为 17.3 dB,因此只需设置阈值比较电平在 25 mV 附近即可实现雪崩鉴别探测。

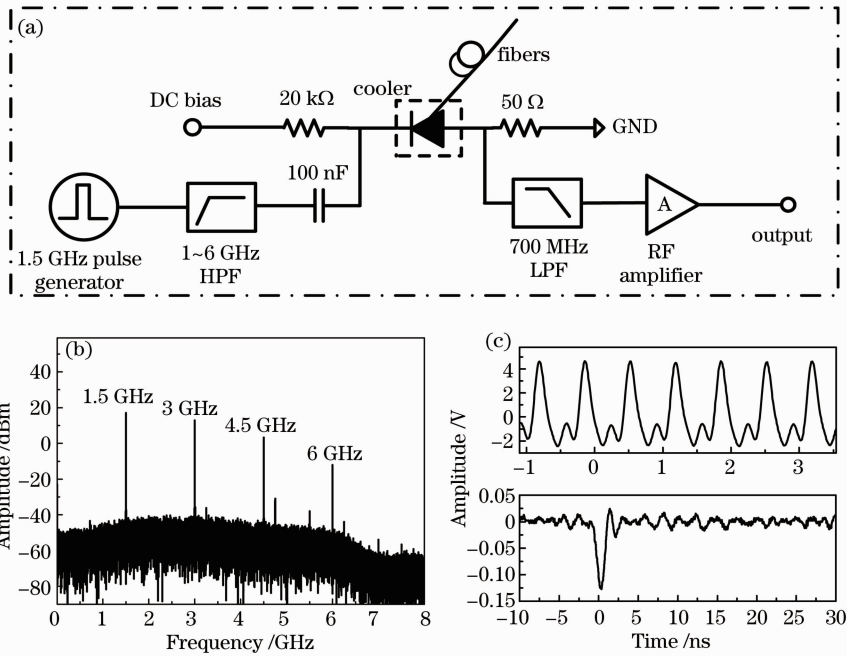


图 1 基于 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP APD 单光子探测原理。(a) APD 工作原理图；(b) 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲的频谱图；(c) 1.5 GHz 门控脉冲波形和雪崩信号波形图

Fig.1 Diagrams of 1.5 GHz harmonics short pulse gated on InGaAs/InP APD single-photon detector. (a) Schematic of gated APD; (b) spectrum of harmonic components for 1.5 GHz short pulse after high-pass filter; (c) waveforms of gated pulse and avalanche signal

### 3 实验结果与讨论

为了测试 InGaAs/InP APD 在 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控驱动下的单光子探测性能, APD 工作在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境下以减小因热效应产生的暗噪声, 测试光源由 1550 nm 的弱相干激光光源衰减到平均每脉冲 0.1 个光子, 其中激光器与 1.5 GHz 超短脉冲均由外部 10 MHz 的触发信号同步触发, 激光器输出的 1550 nm 光子脉冲宽度约为 40 ps, 激光重复频率为 10 MHz, 即光子信号每隔 150 个门控周期照射到 APD 上, 产生的光生雪崩信号接入时间相关光子计数器即可分析 InGaAs/InP APD 的单光子探测性能。使用的时间相关光子计数器为 PicoQuant GmbH 公司的 PicoHarp 300。图 2(a) 为 10% 探测效率下 PicoHarp 300 采集到的光子计数时间分布图, 横坐标为时间, 纵坐标为光子计数, 有效雪崩信号计数集中在 2.3 ns 附近, 并且时间抖动的半峰全宽(FWHM)为 196 ps, 显然比门控脉冲 670 ps 的周期要小, 但是计数峰的半峰全宽却有 2 ns, 这是由于后脉冲效应的影响, 在光生雪崩触发后的 4 个探测门内缺陷捕获的载流子才能有效释放, 并触发伪雪崩计数, 导致雪崩信号被展宽。通过

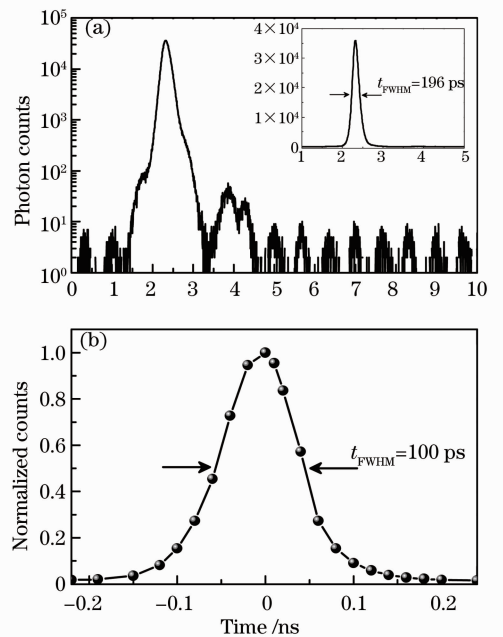


图 2 InGaAs/InP APD 的时间特性。(a) 光子计数的时间分布图；(b) 光子计数率和激光延时的关系曲线  
Fig.2 Timing performance of InGaAs/InP APD. (a) Time histogram of photon counts; (b) relationship between the count rate and laser pulse delay

调节脉冲光子与门控脉冲之间的延时,可以得到图 2(b)所示的有效探测门宽半峰全宽为 100 ps,小于实际所加载的 220 ps 门脉冲宽度,因此这种光子同步探测必须精确控制光子信号和探测门间的延时,确保最佳的探测效率。

为了研究 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP APD 在 1550 nm 波段的探测性能,将 1.5 GHz 正弦门控重复频率加载到此 APD 上进行相同的测试对比。InGaAs/InP APD 置于  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温盒内,1550 nm 光子信号的重复频率为 10 MHz、脉宽为 40 ps,衰减到平均每脉冲 0.1 个光子,切换 1.5 GHz 门控脉冲或正弦信号加载到 InGaAs/InP APD 上,通过调节直流偏压 50.0~52.7 V 的动态范围获得不同探测效率下的暗噪声计数率,如图 3 所示,其中方形曲线为 1.5 GHz 正弦门控探测,圆形曲线为 1.5 GHz 多次谐波短脉冲门控探测。无论是正弦门驱动还是短脉冲驱动,APD 的暗噪声计数率都随着探测效率的增加而增大,但是在相同的探测效率下,1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 APD 的暗计数率要低于 1.5 GHz 正弦门控探测的暗计数率,这是因为在相同的门控重复频率下,多次谐波叠加合成的短脉冲上升时间更快、探测门宽更窄,在探测门内因热效应触发产生的暗噪声雪崩计数也就相对减少了,在 1.5 GHz 正弦门探测时通过调节光子脉冲与正弦门之间的延时测得有效探测门宽半峰全宽为 140 ps,大于 1.5 GHz 短脉冲 100 ps 的有效探测门宽,这就证实了探测门宽越窄时暗噪声越小。同时,InGaAs/InP APD 在 1.5 GHz 的多次谐波超短脉冲门控盖格探测模式下,当直流偏压为 52.2 V 时,探测效率达 35%,暗计数率为每门  $6.4\times 10^{-5}$ 。

后脉冲概率作为 InGaAs/InP APD 的重要参

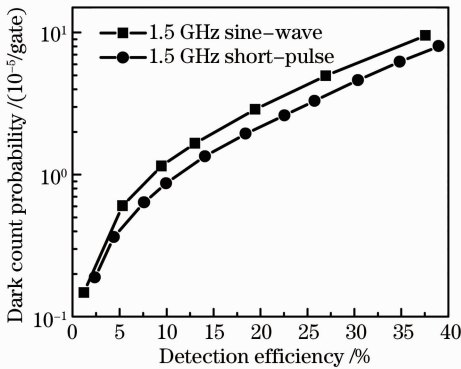


图 3 暗计数率随探测效率的变化

Fig. 3 Dark count probability as function of the detection efficiency

数,通常由光子计数器或多通道时间分析仪来采集计算,因为时间相关光子计数器通常有一定的死时间(PicoHarp 300 的典型死时间为 90 ns),即在光子计数统计时会损失掉一部分计数,特别是在高速探测时丢失的计数更多,因此在图 2(a)中的计数分布图中不能准确反映后脉冲发生概率。为此通过调节时间相关光子计数器 PicoHarp 300 同步触发启动计数和雪崩脉冲信号之间的延时来测量后脉冲概率,每次将时间相关光子计数器启动计数的 10 MHz 同步触发信号相对雪崩信号延时一个门控周期,即 670 ps,这样便可以避开 90 ns 的死时间,控制启动信号与雪崩计数信号的延时完成后脉冲概率的测量。每个不在光子照射下的探测门内发生后脉冲的概率  $P_A = (C_n - C_D)/C_0^{[2,6]}$ ,其中  $C_n$  为第  $n$  个探测门的计数率,将启动计数信号延时到第  $n$  个探测门前测量; $C_D$  为平均每门的暗计数率(即暗计数除以 1.5 GHz 门重复频率); $C_0$  为光子照射下探测门里的计数率,将启动计数信号延时到有效雪崩信号前测量。图 4 所示为 1.5 GHz 多次谐波短脉冲门控 InGaAs/InP APD 在 10%、15% 和 20% 探测效率下,PicoHarp 300 同步启动计数脉冲信号与雪崩计数脉冲信号间不同延时下的后脉冲概率函数曲线图,在光子照射到探测门后的 4 个门内后脉冲概率呈指数衰减,在第 4 个门之后(即 2.7 ns)发生后脉冲的概率小于  $10^{-4}$ ,表明了高重复频率下载流子的释放速度很快。但是值得注意的是,15% 探测效率下的后脉冲概率比 10% 的还小,这是因为在 15% 的探测效率下所加的偏压较高,在高电场下雪崩载流子倍增速率快,被捕获的概率低。而探测效率到

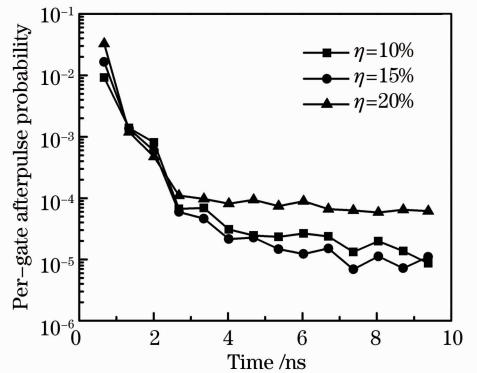


图 4 不同探测效率下,每门的后脉冲概率随光子信号照射到探测门时间的变化

Fig. 4 After pulse probability as a function of delay with the illuminated gate, for different detection efficiencies

20% 时后脉冲概率迅速变大,这是因为高探测效率意味着光生载流子数量的增多,尽管雪崩倍增数率快,但是被缺陷捕获的概率也变大了。在 2.7 ns 后发生后脉冲的概率为每门  $6.0 \times 10^{-5}$ ,光生雪崩发生后的 7.4 ns 后脉冲概率约减小了 1 个数量级,为每门  $6.9 \times 10^{-6}$ 。

## 4 结 论

提出了超短脉冲高通滤波产生多次谐波驱动 InGaAs/InP APD 的单光子探测技术,实现了 1.5 GHz 超短脉冲高通滤波的 4 次谐波门控盖革模式单光子探测,采用 700 MHz 的低通滤波器实现了 50.6 dB 的短脉冲充放电噪声抑制比,有效地提取出了雪崩信号。InGaAs/InP APD 工作在  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境下,1.5 GHz 多次谐波短脉冲驱动 APD 在 1550 nm 的探测效率为 35% 时,暗计数率为每门  $6.4 \times 10^{-5}$ ,这比 1.5 GHz 正弦门控 APD 的暗噪声低,而且在 15% 的探测效率下,光子照射到探测门 2.7 ns 后发生后脉冲的概率为每门  $6.0 \times 10^{-5}$ ,进一步延长到 7.4 ns 时每门的后脉冲概率降低了 1 个数量级,为每门  $6.9 \times 10^{-6}$ 。这一高重复频率、高效率、低噪声的多次谐波脉冲门控 InGaAs/InP APD 单光子探测技术有望在量子密钥分发和光子计数激光测距上得到应用。

## 参 考 文 献

- 1 Mark A Itzler, Xudong Jiang, Mark Entwistle. Power law temporal dependence of InGaAs/InP SPAD afterpulsing [J]. J Mod Opt, 2012, 59(17): 1472-1480.
- 2 Z L Yuan, B E Kardynal, A W Sharpe, *et al.*. High speed single photon detection in the near infrared [J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(4): 041114.

- 3 Lilin Xu, E Wu, Xiaorong Gu, *et al.*. High-speed InGaAs/InP-based single-photon detector with high efficiency [J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(16): 161106.
- 4 Naoto Namekata, Shunsuke Adachi, Shuichiro Inoue. 1.5 GHz single-photon detection at telecommunication wavelengths using sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. Opt Express, 2009, 17(8): 6275-6282.
- 5 Yan Liang, E Wu, Xiuliang Chen, *et al.*. Low timing jitter single-photon detection using 1-GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(13): 887-889.
- 6 Alessandro Restelli, Joshua C Bienfang, Alan L Migdall. Single-photon detection efficiency up to 50% at 1310 nm with an InGaAs/InP avalanche diode gated at 1.25 GHz [J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(14): 141104.
- 7 Chengzhi Peng, Jun Zhang, Dong Yang, *et al.*. Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding [J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(1): 010505.
- 8 J Chen, G Wu, L Xu, *et al.*. Stable quantum key distribution with active polarization control based on time-division multiplexing [J]. New J Phys, 2009, 11(6): 065004.
- 9 Liang Xiaolei, Jiang Wenhao, Liu Jianhong, *et al.*. A 1.25 GHz InGaAs/InP single-photon detector for high-speed quantum cryptography [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0818001. 梁晓磊, 蒋文浩, 刘建宏, 等. 用于高速量子密码系统的 1.25 GHz InGaAs/InP 单光子探测器的研制 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0818001.
- 10 Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, *et al.*. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0208001. 杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术 [J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0208001.
- 11 Min Ren, Xiaorong Gu, Yan Liang, *et al.*. Laser ranging at 1550 nm with 1-GHz sine-wave gated InGaAs/InP APD single-photon detector [J]. Opt Express, 2011, 19(14): 13497-13502.
- 12 Bradley W Schilling, Dallas N Barr, Glen C Templeton, *et al.*. Multiple-return laser radar for three-dimensional imaging through obscurations [J]. Appl Opt, 2002, 41(15): 2791-2799.
- 13 Guang Wu, Lilin Xu, Jie Chen, *et al.*. Fiber-coupled near-infrared single-photon spectrum analyzer based on a InGaAs/InP avalanche photodiode single-photon detector [J]. J Mod Opt, 2009, 56(2): 296-298.

栏目编辑: 何卓铭