

基于双模式探测器的大动态范围激光测距

冯百成¹ 李召辉¹ 师亚帆¹ 颜佩琴¹ 杜秉乘¹ 杜艳伟² 谭天乐² 潘海峰^{1*} 吴光¹

¹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

²上海航天控制技术研究所中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心,上海 201109

摘要 开发了一种基于双模式探测的大动态范围激光测距方法。使用基于硅雪崩光电二极管(APD)的单个探测器在线性模式与盖革模式之间切换,实现了平均光子数为 $1\sim 10^5$ 的大动态强度范围光信号探测。在此基础上,进行了30 m的室内线性探测模式测距和500 m的室外盖革探测模式测距实验,利用时间相关单光子计数设备记录的信号详细分析了两种模式测距的时间特性,证明了这种方法可以根据探测距离和背景环境进行探测模式切换,从而实现大动态范围激光测距。并且进一步分析了APD偏置电压的调节对测距系统测量精度以及探测背景噪声的影响。

关键词 探测器;激光测距;光子计数;双模式探测

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0504001

Laser Ranging with Large Dynamic Range Based on Dual-Mode Detectors

Feng Baicheng¹ Li Zhaohui¹ Shi Yafan¹ Yan Peiqin¹ Du Bingcheng¹
Du Yanwei² Tan Tianle² Pan Haifeng¹ Wu Guang¹

¹State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

²Infrared Exploration Technology Research and Development Center of the China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai Institute of Aerospace Control Technology, Shanghai 201109, China

Abstract A new method of laser ranging is developed by employing a dual-mode photon detector to meet the large dynamic range of the echo photons. A single detector based on Si avalanche photodiode(APD) is operated between the linear mode and the Geiger mode by adjusting the bias voltage on APD and the detected dynamic range of the average photon number is $1\sim 10^5$ per pulse. The 30 m indoor and 500 m outdoor ranging experiments are carried out in the linear mode and the Geiger mode, respectively. The echo signal is recorded by a time correlated single photon counting equipment to investigate the ranging time characteristics in the dual-mode ranging system. The results indicate that the ranging system with a single detector can conveniently switch the operation mode to adapt to different ranging distances and environmental conditions and realize the large dynamic range detection. The measurement accuracy and the detection background noise are further studied while the operation modes are switched under different APD bias voltages.

Key words detectors; laser ranging; photon counting; dual-mode detection

OCIS codes 040.1880;280.3400;030.5260

1 引言

基于光子计数探测的激光测距系统主要是利用时间相关单光子计数(TCSPC)技术,将时间飞行测距的光信号探测灵敏度提高至量子极限^[1],极大地延伸了激光测距的距离量程。例如基于单光子探测器可完成

收稿日期: 2015-11-11; **收到修改稿日期:** 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(11374105)

作者简介: 冯百成(1989—),男,硕士研究生,主要从事单光子探测方面的研究。E-mail: 582551642@qq.com

导师简介: 吴光(1979—),男,博士,研究员,主要从事单光子探测及应用方面的研究。E-mail: gwu@phy.ecnu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: hfpan@phy.ecnu.edu.cn

上万公里卫星激光测距,目前已经形成全球范围的卫星激光测距网^[2-4],为天文地理以及基础物理研究提供了最精确的卫星高度信息。其中,中国科学院上海天文台采用时间抖动约为 30 ps 的硅雪崩光电二极管 (APD)单光子探测器实现了 2×10^4 km 轨道高度的卫星激光测距,单脉冲测距精度达到了 7~8 mm,实现了精度优于 1 cm 的卫星轨道测量^[5]。同时,光子计数激光测距方法在弱光眼安全测距和三维成像研究中也有重要的应用^[6-13]。英国赫瑞瓦特大学 Buller 研究小组使用超导纳米线单光子探测器,结合 TCSPC 方法,实现了 1550 nm 波长亚厘米精度的光子计数激光测距^[14]。上海微系统与信息研究所研制出时间抖动仅为 30 ps 的超导纳米线单光子探测器,实现了 4 mm 距离分辨率的光子计数激光测距^[15]。林肯实验室开发了 Si APD 单光子探测互补金属氧化物半导体 (CMOS) 阵列,实现了无需扫描的 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 光子计数三维成像^[16]。本课题组开发了吉赫兹单光子探测器,首次利用准连续单光子探测方法,实现了 1550 nm 高速光子计数激光测距^[17-19]。

在测距的实际应用中,仅仅具备高灵敏度的探测是远远不够的,还需要同一台探测器能够探测大动态强度范围的回波信号。因为在实际的测距系统中,待测目标的距离以及表面性质都是未知的,因此回波信号的强度也不确定。如果不能支持大动态范围的探测,当回波光信号较强时,处于单光子计数模式的探测器很容易饱和甚至损毁。所以,传统的基于 APD 光子计数模式的探测器,很难做到大动态强度范围的激光测距。本文提出在同一个 APD 探测器上,通过调节偏置电压,完成线性模式和盖革模式切换。根据测量距离和背景环境调节探测器的工作模式,以实现大动态强度范围的测距。当测量近距离目标,回波信号较强时,探测器工作在线性模式;当测量远距离目标,回波信号微弱时,令 Si APD 工作在盖革模式,发挥光子计数激光测距的高灵敏度优势。采用这种双模式的探测技术开展激光测距的实验研究,使光子脉冲探测的动态强度范围超过 6 个数量级,并且通过调节探测器的增益可以有效抑制背景光的干扰,提高探测的信噪比。

2 双模式探测电路

2.1 探测电路原理

双模式 Si APD 探测器原理如图 1(a)所示,当直流偏置电压低于 APD 的雪崩点电压时,APD 工作在线性模式,用于探测强光子脉冲,此时 APD 的输出电流与入射光强成正比;而当直流偏置电压高于 APD 的雪崩点电压时,APD 工作在光子计数的盖革模式,具有高灵敏度。在光子计数的工作模式下,使用主动抑制技术实现 APD 的快速雪崩抑制和恢复。探测电路各部分的信号波形图如图 1(b)所示。

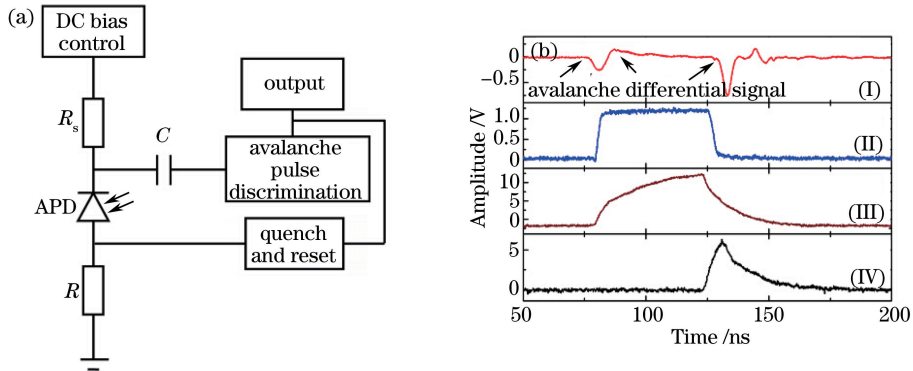


图 1 (a) APD 探测器电路原理图,其中 R_s 为取样电阻, R 为限流电阻, C 为隔直电容;

(b) 电路各节点波形,其中 (I) 为雪崩信号波形, (II) 为最终输出波形, (III) 为抑制信号波形, (IV) 为重置信号波形

Fig. 1 (a) Schematic diagram of APD detector circuit, where R_s is the sampling resistance, R is the current limiting resistance, and C is the direct current (DC) blocking capacitor; (b) waveforms of the circuit, where (I) is the waveform of avalanche signal, (II) is the waveform of output signal, (II) is the waveform of quench signal and (IV) is the waveform of reset signal

2.2 双模式探测器性能测试

使用 Laser Component 公司的 Si APD (Sap500) 构建双模式探测器,APD 的工作温度为 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。测试系统的光源均使用 532 nm 激光器。

探测器工作在盖革模式时,以连续激光器作为光源,入射到探测器靶面的平均光子数为 $3.8 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。APD的雪崩点电压设定为104.5 V,如图2所示,当偏置电压为104.5 V时,探测效率为5%,当偏置电压逐渐增加到114.5 V,探测器达到最高探测效率60%。与此同时,暗计数随探测效率增加而增加,从104.5 V的 90 s^{-1} 增大到114.5 V时的 3800 s^{-1} 。进一步增加偏置电压,Si APD进入饱和区域,探测器效率开始急剧变小,暗计数也急剧下降。

随后调节偏置电压使其在雪崩点电压以下缓慢变小,Si APD进入线性模式,使用对应的探测器来响应强光回波信号。在线性模式下,采用脉冲激光器(重复频率为1 kHz,脉冲宽度为600 ps)作为光源,测试了探测器的光电响应特性。脉冲激光经过衰减,平均光子数为14000 /pulse,如图3所示,测量隔直电容C之后信号脉冲幅度为820 mV。然后,将脉冲激光继续衰减2.6倍,平均光子数为5400 /pulse,此时信号脉冲幅度为310 mV,信号脉冲幅度与入射光强度成正比,此时探测器工作在线性模式。

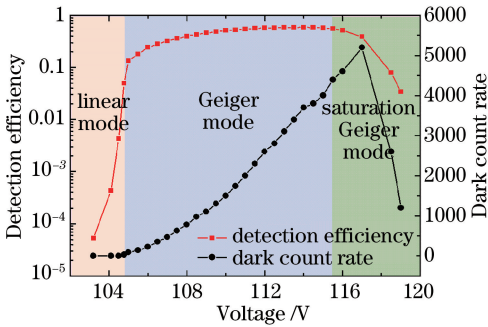


图2 探测效率和暗计数与偏置电压的关系
Fig. 2 Detection efficiency and dark count rate as function of the bias voltage

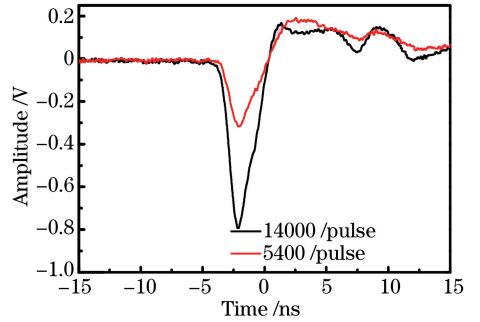


图3 线性模式下探测器输出信号幅度与入射光信号强度成正比
Fig. 3 Output signal amplitude of the detector is in proportion to the input optical signal intensity in the linear mode

随着入射光强度的变化,可以通过调节偏置电压,选择双模式探测器的最佳工作区域。如图4所示,红色区域为每脉冲光子数为 $10^2 \sim 10^5$ 的强光脉冲区,当探测器工作在线性模式时,能够承受大于 10^5 量级的强光子脉冲。蓝色区域为每脉冲光子数小于 10^2 的弱光脉冲区,探测器需要工作在盖革模式。由此证明双模式Si APD探测器可以在平均光子数为 $1 \sim 10^5$ 的大动态强度范围内工作。

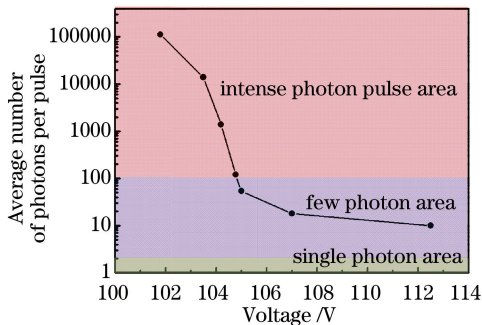


图4 探测光子数与偏置电压的关系

Fig. 4 Average number of photons per pulse as function of the bias voltage

2.3 双模式探测器测距实验装置

基于双模式Si APD探测器,搭建了大动态强度范围激光测距装置,如图5所示。使用重复频率为1 kHz、波长为532 nm的脉冲激光器作为光源,激光光束经过衰减和扩束后出射直径为4 mm,发散角为 0.006° 。用于回波接收的望远镜口径为130 mm,焦长为650 mm。接收到的光信号经过窄带滤光片(半峰全宽为2 nm)滤除背景光后聚焦到Si APD探测器的靶面。单光子探测器的计数脉冲输出连接到TCSPC仪器(HydraHarp 400, Picoquant公司,德国)的停止端,激光脉冲的同步触发信号连接到TCSPC的开始端,最后

使用 TCSPC 方法分析光子脉冲的飞行时间分布。

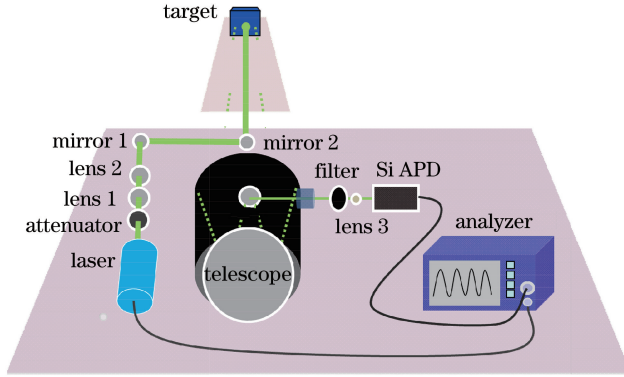


图 5 测距装置示意图

Fig. 5 Schematic of the laser ranging system

使用雷达方程计算测距系统对漫反射目标的回波光接收效率：

$$P_r = \frac{P_e \rho \eta_e \eta_r T_1 T_2 D^2}{8r^2}, \quad (1)$$

式中 P_r 为接收端光功率, P_e 为发射激光的功率, ρ 为目标漫反射系数, η_e 为发射系统效率, η_r 为接收系统效率, T_1 为发射处大气透射率, T_2 为接收处大气透射率, D 为接收望远镜的口径, r 为目标距发射处距离。实际测量得到的参数如表 1 所示。

表 1 雷达方程参数值

Table 1 Parameters of radar equation

ρ	η_e	η_r	T_1	T_2	D / mm
0.7	0.9	0.0018	0.95	0.95	130

3 测距实验结果与分析

使用这套双模式测距系统分别进行距离为 30 m 的室内线性模式测距实验和距离为 500 m 的室外盖革模式测距实验。测距实验利用 TCSPC 设备记录信号脉冲光的飞行时间, 获得回波信号往返飞行的延时信息, 从而得到目标物体的距离。此外, 利用 TCSPC 技术记录的信号, 还可以进一步分析探测器的时间特性和测距系统的背景噪声等参数。

图 6 所示为双模式探测器获得的计数脉冲 TCSPC 分布。图 6(a) 中探测器工作在线性模式, 偏置电压设定为 88 V, 使用 TCSPC 仪测量激光脉冲同步信号与光子计数脉冲之间的时间间隔分布, 测量时间为 2 s, 背景噪声计数率为 1000 s^{-1} , 平均光子数为 $7 \times 10^6 / \text{pulse}$, 累计回波数为 9200, 回波脉冲的时间抖动为 100 ps, 在线性增益较高的区域, 此时接近光子计数模式。由于激光脉冲的涨落, 使得恒定阈值的甄别电路概率性地输出计数脉冲, 本质上不同于光子计数模式是来自于探测器的探测概率。图 6(b) 中探测器工作在盖革模式, 偏置电压设定为 114 V, 此时, 背景噪声为 $2.2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 回波数为 3500, 回波脉冲的时间抖动为 800 ps。

探测器的时间特性在激光测距系统中至关重要, 因而进一步研究了双模式探测中偏置电压的调节对探测器时间特性的影响。图 7(a) 显示线性模式下随着偏置电压的增加, 探测的时间抖动从 96 ps 逐渐降低到 38 ps, 图 7(b) 显示盖革模式下探测的时间抖动同样随着偏置电压的增加而减小。无论在线性模式还是在盖革模式下, 提高偏置电压都可以降低探测器的时间抖动。当背景较强时, 增加偏置电压、提高探测效率会增加背景计数, 降低信噪比, 需要根据实际条件选择合适的工作模式。图 7(a) 中, 线性模式下 TCSPC 信号的峰值时间点随着偏置电压的增加向下漂移, 漂移量从最高点 88 V 的 202.75 ns 漂移到 104 V 时的 202.19 ns, 漂移 560 ps。图 7(b) 中盖革模式下 TCSPC 信号的峰值时间点也从 3437.18 ns 漂移到 3433.34 ns, 漂移了 3.84 ns。偏置电压的增大提高了 APD 增益, 增强了频率响应, 雪崩脉冲的上升沿随之变陡, 采用恒定电压鉴幅, 甄别脉冲的上升沿因而随之向前漂移。所以, 无论在线性模式还是盖革模式下, 偏置

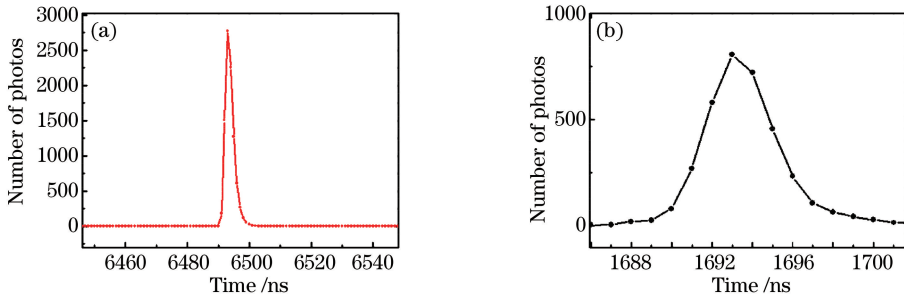


图 6 (a) 线性模式探测器获得的计数脉冲 TCSPC 分布; (b) 盖革模式探测器获得的计数脉冲 TCSPC 分布

Fig. 6 (a) TCSPC distribution of the detector in linear mode; (b) TCSPC distribution of the detector in Geiger mode

电压的增加会使 TCSPC 信号的峰值点出现漂移, 这表明在实际测距系统中, 必须对测距的峰值时间进行归一化补偿, 从而减小测量误差。

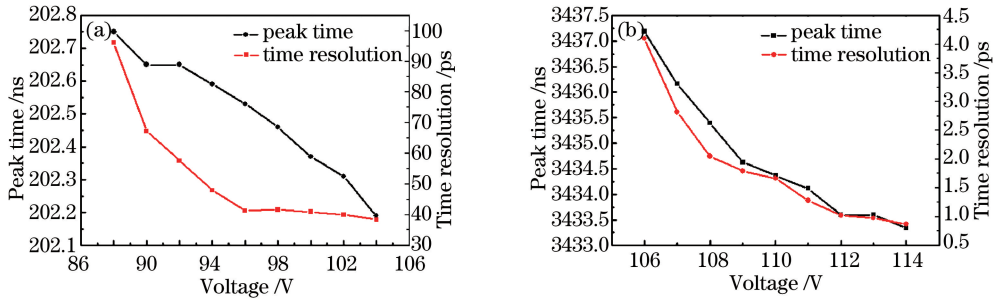


图 7 (a) 线性模式下时间抖动和峰值时间与偏置电压的关系; (b) 盖革模式下时间抖动和峰值时间与偏置电压的关系

Fig. 7 (a) Time resolution and peak time as function of the bias voltage in linear mode;

(b) time resolution and peak time as function of the bias voltage in Geiger mode

当测距系统工作在盖革模式下时, 探测器工作在光子计数状态, 适用于回波信号非常微弱的情况。此时, 探测器 APD 处于高增益状态, 因此测距系统非常容易被背景噪声干扰。在距离为 500 m 的室外盖革模式测距实验中, 测量了背景噪声与偏置电压的关系。随着偏置电压从 106 V 增加到 114 V, 背景噪声从 7.7×10^5 增加到 2.2×10^6 。因此, 减小 APD 偏置电压可以降低背景噪声, 但是会增加探测的时间抖动, 因此为了兼顾测距系统的探测灵敏度和精确度, 需要根据实际条件选择合适的偏置电压。

4 结 论

开发了一种通过调节 APD 偏置电压来实现线性模式和盖革模式互相切换的激光测距系统, 实现了每脉冲光子数为 $1 \sim 10^5$ 的大动态强度范围回波光子信号探测。分别测试了 Si APD 探测器在线性模式与盖革模式下的探测效率和时间特性等参数。证明通过两种模式的相互切换, 可以适应不同的探测距离和背景环境, 将线性模式响应度高和盖革模式灵敏度强的优势最大化, 有效降低了背景噪声的影响。该双模式激光测距技术为实际激光测距应用中利用单个探测器直接实现大动态强度范围探测提供了一种有效的手段。

参 考 文 献

- Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. Nature Photonics, 2009, 3(12): 696-705.
- Combrinck L. Satellite laser ranging[M] // Sciences of Geodesy-1. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 301-338.
- Sośnica K, Thaller D, Dach R, *et al.*. Satellite laser ranging to GPS and GLONASS [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(7): 725-743.
- Yin J, Cao Y, Liu S B, *et al.*. Experimental quasi-single-photon transmission from satellite to earth[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 20032-20040.
- Yang Fumin, Chen Wanzhen, Zhang Zhongping, *et al.*. The satellite laser ranging experiment of the range precision of sub centimeter by Shanghai Astronomical Observatory[J]. Science in China, 2002, 32(10): 935-939.

- 杨福民, 陈婉珍, 张忠萍, 等. 上海天文台亚厘米级单次测距精度的卫星激光测距试验[J]. 中国科学, 2002, 32(10): 935-939.
- 6 Becker W, Benndorf K, Bergmann A, *et al.*. FRET measurements by TCSPC laser scanning microscopy[C]. SPIE, 2001, 4431: 94-98.
- 7 Chen S J, Liu D K, Zhang W X, *et al.*. Time-of-flight laser ranging and imaging at 1550 nm using low-jitter superconducting nanowire single-photon detection system[J]. Applied Optics, 2013, 52(14): 3241-3245.
- 8 McCarthy A, Collins R J, Krichel N J, *et al.*. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting[J]. Applied Optics, 2009, 48(32): 6241-6251.
- 9 Hirvonen L M, Festy F, Suhling K. Wide-field time-correlated single-photon counting (TCSPC) lifetime microscopy with microsecond time resolution[J]. Optics Letters, 2014, 39(19): 5602-5605.
- 10 Sjöqvist L, Henriksson M, Jonsson P, *et al.*. Time-correlated single-photon counting range profiling and reflectance tomographic imaging[J]. Advanced Optical Technologies, 2014, 3(2): 187-197.
- 11 Jo S E, Kim T H, Kong H J. Development of a low-noise three-dimensional imaging LIDAR system using two 1×8 Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 306: 31-37.
- 12 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.
- 13 Wang Dinan, Chen Changqing, Wang Tingfeng. A study on photon counting detection principle of Geiger-mode avalanche photodiode[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 121202.
- 王弟男, 陈长青, 王挺峰. 盖革模式雪崩光电二极管光子计数探测原理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 121202.
- 14 Warburton R E, McCarthy A, Wallace A M, *et al.*. Subcentimeter depth resolution using a single-photon counting time-of-flight laser ranging system at 1550 nm wavelength[J]. Optics Letters, 2007, 32(15): 2266-2268.
- 15 O'Connor J A, Tanner M G, Natarajan C M, *et al.*. Spatial dependence of output pulse delay in a niobium nitride nanowire superconducting single-photon detector[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(20): 201116.
- 16 Aull B F, Loomis A H, Young D J, *et al.*. Three-dimensional imaging with arrays of Geiger-mode avalanche photodiodes [C]. SPIE, 2004, 5353: 105-116.
- 17 Liang Y, Huang J, Ren M, *et al.*. 1550-nm time-of-flight ranging system employing laser with multiple repetition rates for reducing the range ambiguity[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4662-4670.
- 18 Ren M, Gu X, Liang Y, *et al.*. Laser ranging at 1550 nm with 1-GHz sine-wave gated InGaAs/InP APD single-photon detector[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13497-13502.
- 19 Huang Jianhua, Wu Guang, Zeng Heping. Study of 1.5 GHz harmonics ultrashort pulse gated InGaAs/InP avalanche photodiode single-photon detection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0204001.
- 黄建华, 吴 光, 曾和平. 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[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0204001.