

# 基于温漂自动补偿的高稳定性 Si-APD 单光子探测器

颜佩琴<sup>1</sup>, 孟文东<sup>1</sup>, 王煜蓉<sup>1</sup>, 李召辉<sup>1</sup>, 陶宇亮<sup>2</sup>, 彭欢<sup>2</sup>, 潘海峰<sup>1\*</sup>, 吴光<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>北京空间机电研究所, 北京 100091

**摘要** 硅雪崩光电二极管(Si-APD)的雪崩电压对温度极大地限制了基于 Si-APD 的单光子探测器在全天候野外条件下的实际应用。提出了一种可以在大环境温度变化范围内稳定工作的 Si-APD 单光子探测技术。通过制冷与数字偏压补偿相结合的技术,自动补偿 Si-APD 的工作温度漂移,保持稳定的雪崩增益。实验证明在 $-40\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内采用该技术的单光子探测器工作稳定。实验结果表明采用温漂自动补偿的技术后, Si-APD 单光子探测器具备了在温度变化较大的外场稳定运行的能力,为机载或星载光子计数激光测量提供了高稳定性的单光子探测技术。

**关键词** 探测器; 单光子探测器; 硅雪崩光电二极管; 温度控制; 自动补偿

中图分类号 TN29 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.080403

## Si-APD Single-Photon Detector with High Stability Based on Auto-Compensation of Temperature Drift

Yan Peiqin<sup>1</sup>, Meng Wendong<sup>1</sup>, Wang Yurong<sup>1</sup>, Li Zhaohui<sup>1</sup>, Tao Yuliang<sup>2</sup>,  
Peng Huan<sup>2</sup>, Pan Haifeng<sup>1</sup>, Wu Guang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

<sup>2</sup>Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100091, China

**Abstract** The avalanche voltage of the Si avalanche photodiode (Si-APD) is temperature sensitive, which greatly limits the practical application of the single-photon detector based on Si-APD for the all-weather operation in field. A technology is developed to guarantee stable working of the Si-APD single-photon detector with a wide-range environmental temperature tolerance. The digital bias voltage auto-compensation technique is combined with the refrigeration, which can automatically compensate the operation temperature drift and maintain a stable avalanche gain of the Si-APD. The experiment proves that the single-photon detector with this technology can work stably in the temperature range from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The experimental result indicates that by using the proposed auto-compensation technique, the Si-APD single-photon detector has the ability of stable working in the outfield with great change of temperature. The single-photon detection technology with high stability can be provided for the photon counting laser measurement of the airborne and satellite-borne.

**Key words** detectors; single-photon detector; Si avalanche photodiode; temperature control; auto-compensation

**OCIS codes** 040.5160; 040.1880; 040.1345; 040.6040

## 1 引言

单光子探测器是各类基于单光子探测的激光探测系统中的核心器件之一,目前主要的单光子探测器件有光电倍增管(PMT)、超导单光子探测器(SSPD)、多像素光子计数器(MPPC)、雪崩光电二极管(APD)

收稿日期: 2017-03-10; 收到修改稿日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(11374105)

作者简介: 颜佩琴(1991—),女,硕士研究生,主要从事单光子探测方面的研究。E-mail: YPQ1991@126.com

导师简介: 吴光(1979—),男,博士,研究员,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

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

等<sup>[1-9]</sup>。其中,APD工作在盖革模式时具有高内部雪崩增益,使其成为微弱光信号探测的理想器件,被广泛应用于激光测距、三维成像、光谱分析、光纤传感、激光通信、军事探测和天文观测等诸多领域<sup>[10-21]</sup>。此外,APD器件具有尺寸小、功耗低、驱动简单、便于形成阵列等优点,非常符合现今探测器小型化、集成化的发展趋势,尤其适用于野外实际环境中使用的设备和单元器件。但是APD器件存在温度敏感的缺点,其雪崩电压会随着温度发生变化<sup>[22]</sup>,导致雪崩增益发生变化,直接影响探测效率、暗计数等重要性能指标,导致测量出现较大误差。目前绝大多数Si-APD单光子探测器都是基于室温设计的,对工作环境温度敏感,不利于全天候室外工作。

针对APD雪崩电压随温度漂移这一问题,国内外不少科研工作者开展了相关研究,目前主要采用的方法大致有两种。一种方法是采用温度控制,使APD工作在设定的温度下,以保持稳定的雪崩增益,目前温度控制精度可优于 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[23-24]</sup>。最常采用的温控方法是利用半导体制冷片对APD进行制冷,使之工作在某一特定的低温下,减小暗计数的影响,提高探测信噪比。但是半导体制冷片最大可制冷温差有限,导致温度控制范围有限,而采用水冷、风冷等其他制冷方式,又存在制冷设备体积过大的问题,不利于单光子探测器的小型化、轻量化。另一种方法是对APD采取偏压温度补偿,测出APD所需偏置电压与温度的关系曲线,从而根据温度的变化相应调整加载在APD上的反向偏置电压,以此保证APD稳定的雪崩增益。目前偏压补偿控制的精度已达到毫伏量级<sup>[25]</sup>。安徽光学精密机械研究所设计的基于DS3501的APD偏压温度补偿电路<sup>[26]</sup>,其APD偏压相对误差小于 $0.25\%$ 。该补偿电路应用于荧光法溶解氧测量系统中,显著提高了系统的测量精度,测量结果相对误差小于 $1\%$ ;北京航空制造工程研究所设计的基于PIC单片机的APD温度补偿数控偏压电路<sup>[27]</sup>,可在 $-30\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度变化范围内实现对APD增益的良好补偿。但是只采用偏压补偿,只能任由APD的实际工作温度随着环境温度变化。随着温度的升高会引起暗计数的急剧增大,影响信噪比,不能满足探测系统的信噪比要求,致使APD不能发挥其最佳探测性能。此外APD,器件本身也受到正常工作温度范围的限制。

综上,由于这两种方式各自存在的局限性,为了尽可能地发挥APD的最佳探测性能,同时保持不同温度条件下雪崩增益的稳定,本文提出了一种可以在大环境温度变化范围内稳定工作的单光子探测技术。对Si-APD器件采用温度控制与数字偏压补偿控制相结合的技术手段,实现对温度漂移引起的雪崩电压变化的自动补偿,保证Si-APD单光子探测器在 $-40\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内以高稳定性工作。

## 2 温度漂移自动补偿的 Si-APD 单光子探测器

单光子探测器的原理如图1所示。其中, $R_1$ 为限流电阻; $R_2$ 为信号电阻; $R_{th}$ 是热敏电阻;HV是反向偏置电压;TEC为半导体制冷片;Si-APD器件为SAP500(Laser Components,德国)。

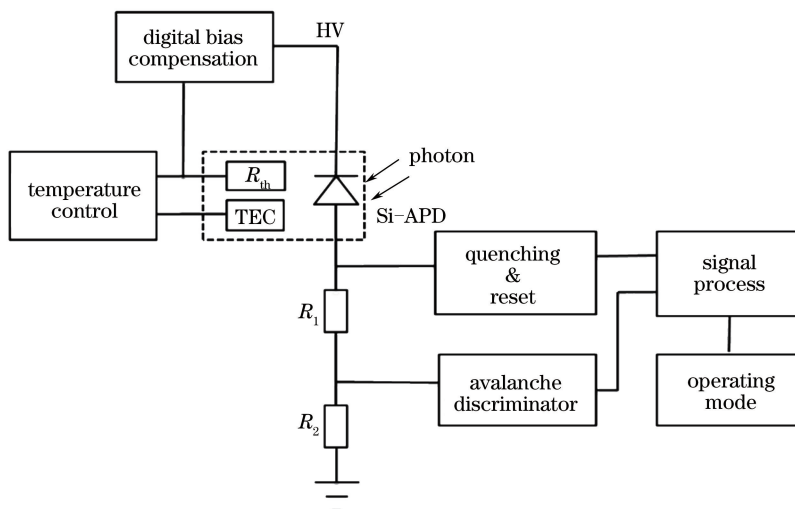


图1 Si-APD单光子探测器原理图

Fig. 1 Schematic of Si-APD single-photon detector

当加载在 APD 上的反向偏置电压大于其雪崩电压时, APD 工作在盖革模式, 可以对单个光子进行探测。入射光子使 Si-APD 雪崩增益放大, 通过信号电阻  $R_2$  将雪崩信号提取出来, 然后经过雪崩鉴别得到数字脉冲信号。在信号处理单元中, 通过单稳态触发电路和差分放大电路对鉴别出的数字脉冲信号进行脉冲整形以及放大。随后, 对 APD 发出一个淬灭信号脉冲, 将偏置电压降至雪崩电压以下, 使雪崩过程迅速淬灭, 及时终止雪崩过程可以实现对 APD 的有效保护。同时为使 APD 快速准备好探测下一个到来的光子, 提高 Si-APD 的探测速率, 通过发出重置信号将 APD 重新设置到盖革工作模式。利用这样的设计, 可自由选择 Si-APD 单光子探测器的工作模式(连续工作模式或门控工作模式), 以满足不同条件的实际工作需要。

在探测器设计中, 通过温度控制单元和数字偏压补偿单元控制 APD 的雪崩增益过程, 自动根据外界温度的变化作出相应的调整, 在大温度动态变化范围内保证单光子探测功能和指标的高稳定性。出于对 APD 单光子探测效率与暗计数指标的综合考量, 将 APD 的目标工作温度设定为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据不同的工作温度条件, APD 的工作模式可以分为以下三种情况。1) 当 APD 实际工作温度高于目标温度, 但没有超过半导体制冷片的最大制冷温差时, 温度控制单元控制半导体制冷片对 Si-APD 进行制冷, 将 Si-APD 稳定在目标温度。此时, 数字偏压补偿单元控制加载在 APD 上的反向偏置电压 HV 保持不变, 从而确保 Si-APD 探测性能的稳定。2) 当 APD 实际工作温度低于目标温度时, Si-APD 所需的雪崩电压随着温度的降低而减小, 此时通过数字偏压补偿单元调整加载在 Si-APD 上的偏置电压, 稳定雪崩增益。之所以不单纯采用对 APD 进行制热的方式稳定实际工作温度, 是因为充分利用外界低温条件更有利于降低暗计数, 提高探测性能。3) 当外界温度过高, 导致 APD 实际工作温度超过半导体制冷片的最大制冷温差时, 温度控制单元无法将 APD 制冷到目标温度。此时, APD 的雪崩电压随着实际温度的升高而增大, 数字偏压补偿单元自动调节 APD 偏置电压, 补偿温度漂移导致的雪崩电压变化, 保持稳定的雪崩增益。

数字偏压补偿单元由温度传感模块、单片机电压转换模块以及高压模块三部分组成。如图 2 所示,  $R_{th}$  为负温度系数的热敏电阻, 其将 APD 的工作温度变化量转换为电压量  $V_{R_{th}}$ , 并作为单片机电压转换模块的输入信号。所选用的单片机为 AVR 系列 ATmega16M1 芯片(Atmel, 美国), 通过单片机内部编程实现电压的变换。电压转换模块的信号输出至高压模块, 可以实现根据实际工作温度变化, 自动调节加载在 APD 上的反向偏置电压的效果。

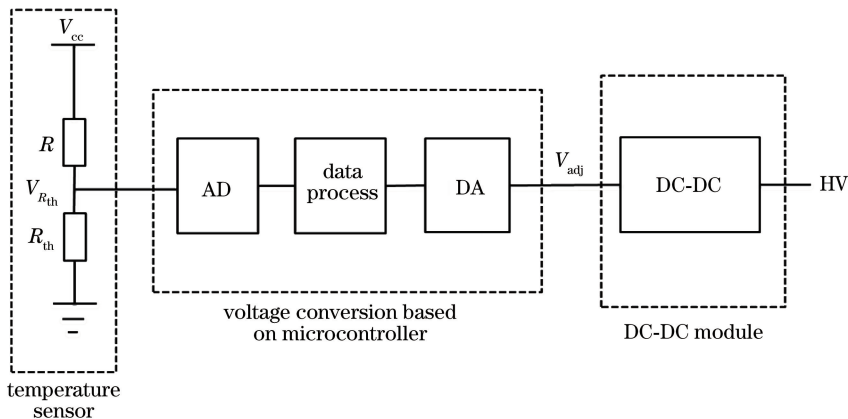


图 2 数字偏压补偿模块原理图

Fig. 2 Schematic of digital bias-voltage compensation module

对于盖革工作模式下的 Si-APD 而言, 设置合适的偏置电压至关重要, 过小会影响雪崩增益无法对单个光子进行有效探测; 过大会导致暗计数过高, 影响单光子探测信噪比。且 Si-APD 的雪崩电压与温度密切相关, 所以确定 APD 偏置电压与温度的关系曲线是实现自动补偿控制的前提。实验中, 使用输出功率稳定的 709 nm 脉冲激光器作为光源, 先在室温下调整探测器的探测效率为 55%, 此时暗计数约为  $700\text{ s}^{-1}$ 。利用高低温实验箱模拟外界环境温度的变化, 保持探测器的探测效率不变, 获得不同温度下 Si-APD 偏置电压 HV 随温度的变化曲线, 如图 3 所示, 其中温度值使用热敏电阻  $R_{th}$  处的电压  $V_{R_{th}}$  来表征[图 3(b)中给出了电压  $V_{R_{th}}$  对应的温度值]。

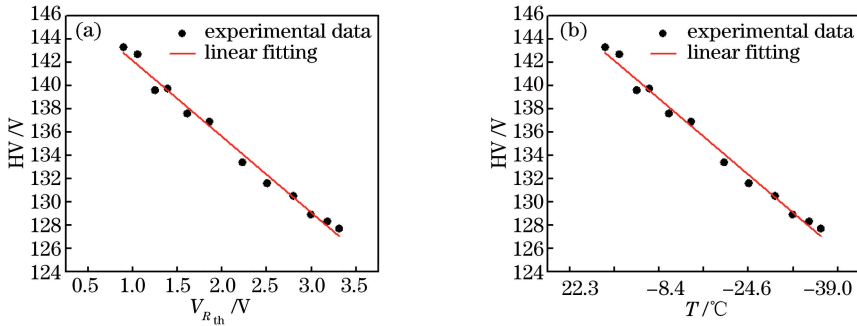


图 3 Si-APD 偏置电压与热敏电阻电压的关系曲线

Fig. 3 Relation curve of the bias voltage of Si-APD and the thermistor voltage

对以上数据进行线性拟合, 获得 HV 与  $V_{R_{th}}$  的数学关系为

$$f_{HV} = 148.625 - 6.5198 \times V_{R_{th}}, \quad (1)$$

DC-DC 高压模块中 HV 与  $V_{adj}$  的关系为

$$f_{HV} = 1.395 + 52.5107 \times V_{adj}, \quad (2)$$

式中  $V_{R_{th}}$  和  $V_{adj}$  分别为单机电压转换模块的模数(AD)转换输入电压和数模(DA)转换输出电压。

根据(1)式和(2)式, 推导得到  $V_{adj}$  与  $V_{R_{th}}$  的关系为

$$V_{adj} = 2.804 - 0.1242 \times V_{R_{th}}. \quad (3)$$

使用  $D_1, D_2$  分别表示电压  $V_{R_{th}}, V_{adj}$  所对应的数字量, 单片机内部 10 位 AD 转换公式和 DA 转换公式为

$$\begin{cases} D_1 = V_{R_{th}}/V_{cc} \times (2^{10} - 1) \\ D_2 = V_{adj}/V_{cc} \times (2^{10} - 1) \end{cases}. \quad (4)$$

根据(3)式和(4)式, 并考虑单片机内部模拟连续量与数字离散量相互转换时存在偏差对器件的温漂等因素, 对其进行修正后, 得到单片机内部数字量  $D_1$  和  $D_2$  的理论转换关系为

$$D_2 = 585 - 0.1267 \times D_1. \quad (5)$$

经过实际测试, 修正后的程序中反向偏置电压 HV 的实际值与理论值的差距控制在 0.5 V 以内, 能较好地满足 APD 实际工作时所需要的反向偏压控制精度。

### 3 探测器性能测试及结果分析

为测试 Si-APD 的反向偏置电压通过单片机实现自动补偿控制的效果, 单光子探测器被放置于高低温试验箱中, 测量不同温度条件下的单光子探测性能。第一次测试结果表明: 在  $-40 \sim 30$  °C 的环境温度范围内, 单光子探测器的探测效率基本稳定在  $54.8\% \pm 1.7\%$  (709 nm), 暗计数稳定在  $1000 \text{ s}^{-1}$  以下; 当温度超过  $35$  °C 后, 暗计数和探测效率指标发生明显变化。为进一步增大稳定工作的温度动态范围, 对单片机中的数据转换关系进行再次修正, 尤其在高温段对偏置电压进一步进行补偿控制, 最终测试的数据结果如图 4 所示。

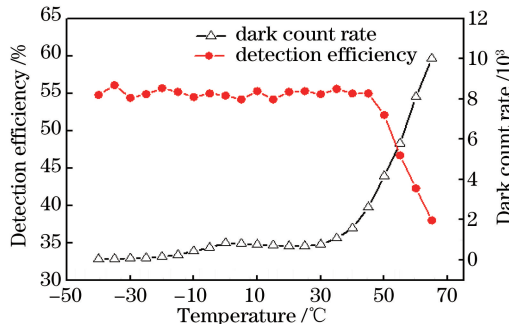


图 4 最终测试中 Si-APD 单光子探测器的探测效率和暗计数随温度的变化

Fig. 4 Detection efficiency and dark count of the Si-APD single-photon detector as a function of the temperature in the final test



当温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Si-APD 单光子探测器的暗计数随着温度的降低而减小, 在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下暗计数仅为 $50\text{ s}^{-1}$ 。利用低温区的环境温度可以有效降低探测器的暗计数, 既可以充分发挥 APD 的性能, 还可以节省探测器能耗。当环境温度为 $-10\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 利用温度控制模块使 Si-APD 稳定在目标工作温度, 单光子探测器的暗计数和探测效率基本不变。当环境温度超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 超过半导体制冷片的最大制冷温差, Si-APD 的工作温度随着环境温度升高而有所上升, 补偿控制系统自动调节 APD 偏置电压来弥补温度漂移造成的雪崩电压的改变, 以此来保持探测效率的稳定。

将 Si-APD 单光子探测器最终测试得到的探测性能与没有偏压自动补偿时的结果进行对比, 如图 5 所示。

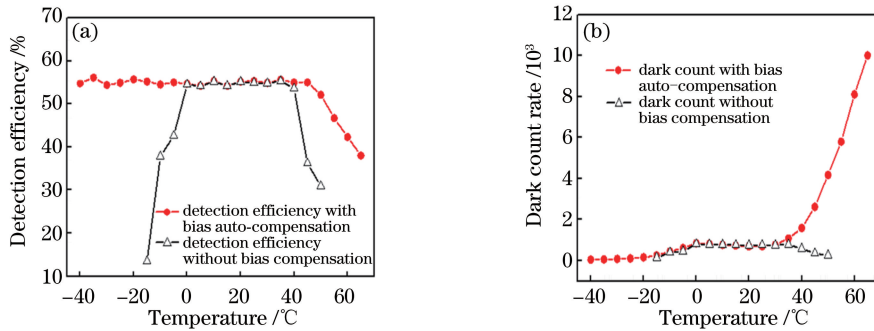


图 5 有无偏压补偿对 Si-APD 单光子探测器的 (a) 探测效率和 (b) 暗计数的影响

Fig. 5 Effect of bias compensation on (a) detection efficiency and (b) dark count of the Si-APD single-photon detector

从图 5 曲线可以看出, 由于偏压温度补偿的作用, 稳定的探测效率对应的温度动态范围有了明显的扩大。即使处于较为极端的条件(温度达到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时, 探测器的探测效率仍能保持在 $42.3\%$ 。没有偏压温度补偿的情况下, 低温段所加载的反向偏置电压远高于其所需的雪崩电压, 而高温段反向偏置电压不足, 使得相应的雪崩增益都出现了明显的减小, 导致在低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以及高于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度段内, 探测效率均出现骤减的现象。而对于暗计数而言, 高温段雪崩增益的影响超过了温度的影响, 因而暗计数也出现了减小的现象。以上结果充分证明所提出的技术方案可以有效扩大探测效率保持稳定的温度范围, 使 Si-APD 单光子探测器能够在更严苛的环境条件下稳定工作。

## 4 结 论

采用温度控制与数字偏压补偿相结合的方法, 基于 AVR 单片机的偏压自动补偿的技术方案, 有效地实现了对温度变化引起的 APD 雪崩电压漂移的自动补偿。Si-APD 单光子探测器在 $-40\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内具有非常稳定的探测性能, 完全可以满足全天候外场环境的实际应用需求。通过对单片机程序的简单修正, 可以实现对更高温度条件下的偏置电压的再次补偿, 进一步扩大探测性能保持稳定的温度动态范围, 以应对探测器在机载甚至星载等更严苛的温度条件下的应用需要。

## 参 考 文 献

- [1] Natarajan C M, Tanner M G, Hadfield R H. Superconducting nanowire single-photon detectors: Physics and applications[J]. Superconductor Science and Technology, 2012, 25(6): 063001.
- [2] Li H, Zhang L, You L, *et al.* Large-sensitive-area superconducting nanowire single-photon detector at 850 nm with high detection efficiency[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17301-17308.
- [3] Kardynal B E, Yuan Z L, Shields A J. An avalanche-photodiode-based photon-number-resolving detector[J]. Nature Photonics, 2008, 2(7): 425-428.
- [4] Namekata N, Adachi S, Inoue S. 1.5 GHz single-photon detection at telecommunication wavelengths using sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6275-6282.
- [5] Ren M, Wu E, Liang Y, *et al.* Quantum random-number generator based on a photon-number-resolving detector[J]. Physical Review A, 2011, 83(2): 023820.

- [6] He Weiji, Sima Boyu, Cheng Yaojin, *et al.* Photon counting imaging based on GM-APD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1831-1837.  
何伟基, 司马博羽, 程耀进, 等. 基于盖格-雪崩光电二极管的光子计数成像[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1831-1837.
- [7] 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.
- [8] Feng Baicheng, Li Zhaohui, Shi Yafan, *et al.* Laser ranging with large dynamic range based on dual-mode detectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0504001.  
冯百成, 李召辉, 师亚帆, 等. 基于双模式探测器的大动态范围激光测距[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0504001.
- [9] Huo Linzhang, Tan Hesheng, He Ran, *et al.* Research of blue-violet enhanced silicon photomultiplier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 110401.  
霍林章, 谭何盛, 何燃, 等. 蓝紫光增强硅光电倍增器的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 110401.
- [10] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 696-705.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Bao Z, Liang Y, Wang Z, *et al.* Laser ranging at few-photon level by photon-number-resolving detection[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 3908-3912.
- [15] 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.
- [16] Kong H J, Kim T H, Jo S E, *et al.* Smart three-dimensional imaging lidar using two Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19323-19329.
- [17] Kou Tian, Wang Haiyan, Wang Fang, *et al.* Model of moving target trajectory detected based on airborne laser radar imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 101002.  
寇添, 王海晏, 王芳, 等. 基于机载激光雷达成像的动目标轨迹检测模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 101002.
- [18] 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.
- [19] Maccarone A, McCarthy A, Ren X, *et al.* Underwater depth imaging using time-correlated single-photon counting[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33911-33926.
- [20] Garipey G, Tonolini F, Henderson R, *et al.* Detection and tracking of moving objects hidden from view[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 23-26.
- [21] Lu Qiang, Zeng Fei, Zhang Yuliang, *et al.* Influence of sky background radiation on bit error rate of atmospheric laser communication system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 070103.  
鲁强, 曾飞, 张玉良, 等. 天空背景辐射对大气激光通信系统误码率的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(7): 070103.
- [22] Feng Jinyuan, Chen Hongjuan, Li Lixiu, *et al.* The temperature control system and characteristics of the single-photon detector APD[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 0237.  
冯金垣, 陈红娟, 李丽秀, 等. 单光子探测器雪崩光电二极管的低温控制系统及其温度特性[J]. *光学技术*, 2006, 32(2): 0237.
- [23] Liu Fengjiang, Zhang Xiaoqing, Jia Yudong. Design of closed-loop temperature controlled APD photoelectric detector[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(5): 97-99.

- 刘风江, 张晓青, 贾豫东. 闭环温度控制的 APD 光电探测器设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(5): 97-99.
- [24] Qi Shaoshuai, Zhang Tianshu, Fu Yibin, *et al.* Constant temperature control system design of single photon detector SPAD[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2016, 33(1): 81-87.
- 亓少帅, 张天舒, 付毅宾, 等. 单光子探测器 SPAD 恒温控制系统设计[J]. 量子电子学报, 2016, 33(1): 81-87.
- [25] Guo Yongshuai, Lai Kangsheng. Design of numerical control bias source of avalanche photodiode based on DSP[J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(3): 99-100.
- 郭永帅, 赖康生. 基于 DSP 的雪崩光电二极管数控偏压源设计[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(3): 99-100.
- [26] Shi Chaoyi, Zhang Yujun, Yin Gaofang, *et al.* Design of automatic APD bias voltage compensation circuit based on DS3501[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(3): 1-3.
- 石朝毅, 张玉钧, 殷高方, 等. 基于 DS3501 的 APD 偏压温度补偿电路设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(3): 1-3.
- [27] Song Jianhua. Digital control bias circuit of APD with temperature compensation [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(2): 12-15.
- 宋建华. 具有温度补偿的 APD 数控偏压电路[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(2): 12-15.