

超低暗计数率硅单光子探测器的实现

刘岩鑫^{1,2}, 范青^{1,2}, 李翔艳^{1,2}, 李少康^{1,2}, 王勤霞^{1,2}, 李刚^{1,2*}, 张鹏飞^{1,2}, 张天才^{1,2**}

¹山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

²山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 研究了在 Geiger 模式下工作的单光子雪崩二极管的温度特性。结果表明,该雪崩二极管的雪崩电压随温度的降低呈线性减小,电压温度系数为 0.42 V/K。当该雪崩二极管在 13 V 以上雪崩电压下工作时,暗计数率随着温度的降低呈指数下降趋势,温度每降低 8.58 K,暗计数率减小一半,当温度从 274 K 降低到 192 K 时,该雪崩二极管的暗计数率从 13900 Hz 减小到了 14 Hz。将工作温度为 260 K,暗计数率为 58 Hz 的单光子雪崩二极管冷却到 192 K,并且调整二极管两端的偏置电压,使其在波长为 852 nm 时的探测效率为 50%,暗计数率降为 0.064 Hz,后脉冲概率为 6.7%,单光子探测器的性能得到显著提高。这种超低暗计数率单光子探测器在量子通讯、弱光探测等领域具有广阔的应用前景。

关键词 探测器; 量子通讯; 单光子探测器; 暗计数率; 雪崩二极管

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1004001

Realization of Silicon Single-Photon Detector with Ultra-Low Dark Count Rate

Liu Yanxin^{1,2}, Fan Qing^{1,2}, Li Xiangyan^{1,2}, Li Shaokang^{1,2}, Wang Qinxia^{1,2}, Li Gang^{1,2*},
Zhang Pengfei^{1,2}, Zhang Tiancai^{1,2**}

¹ State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

² Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract In this work, the temperature characteristics of a single-photon avalanche diode working in Geiger mode are studied. The experimental results show that the avalanche voltage of the avalanche diode linearly decreases with the decrease in temperature and the voltage temperature coefficient is 0.42 V/K. When the avalanche diode works at an avalanche voltage of more than 13 V, the dark count rate decreases exponentially with the decrease in temperature. In addition, the dark count rate decreases by half for each 8.58 K decrease in temperature. Furthermore, when the temperature drops from 274 K to 192 K, the dark count rate of the avalanche diode also decreases from 13900 Hz to 14 Hz. The single-photon avalanche diode with an operating temperature of 260 K and a dark count rate of 58 Hz is cooled to 192 K. The bias voltage at both ends of the diode is adjusted to ensure that the dark count rate is reduced to 0.064 Hz and the after-pulse probability is 6.7% when the detection efficiency is 50% at wavelength of 852 nm. Thus, the performance of the single-photon detector is significantly improved. Moreover, the single-photon detector with an ultra-low dark count rate has significant applications in quantum communication and weak light detection.

Key words detectors; quantum communication; single photon detection; dark count rate; avalanche diode

OCIS codes 040.6070; 060.5565; 250.1345

1 引 言

光子^[1]是光场的最小能量单位,单个光子的有

效探测在激光测距^[2]、荧光显微镜^[3]、天文望远镜^[4]等领域中有重要的应用。特别是在量子信息^[5-8]领域,量子比特被编码于单光子上进行传输和变换,最

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2020-01-16; 录用日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(11974225,11574187,11634008,11674203,11974223)、山西省“1331 工程”重点学科建设计划

* E-mail: gangli@sxu.edu.cn; ** E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

终被探测器探测,从而人们获得其所携带的信息,因此单光子的高效探测是许多应用的基础。近红外波段一个光子的能量大约是 10^{-19} J,能够探测到如此微弱光信号的单光子探测器主要有光电倍增管、雪崩二极管及超导纳米线探测器。光电倍增管的暗电流较低,光谱能够覆盖紫外区域,在过去几十年里一直占据着主导地位,但其量子效率较低,在以单光子为基础的量子信息处理领域中的应用较少。雪崩二极管在 Geiger 模式下工作,其量子效率在近红外波段较高,价格便宜、使用方便,在量子探测领域应用广泛^[9-11]。雪崩二极管的暗计数率受到材料和环境的限制,商用产品的暗计数率很难达到 10 Hz 以下,同时其在 Geiger 模式下工作,不能分辨光子数,不能满足某些特殊量子探测的要求。超导纳米线探测器具有可分辨光子的能力,能够对紫外到红外波段的光子产生响应,探测效率接近 100%,是单光子探测的理想器件。但超导纳米线探测器价格昂贵,并且需要极低的工作温度,系统体积较大,不利于大规模应用。

本文主要研究工作于 Geiger 模式下的雪崩硅二极管的暗计数率随温度的变化特征,提出一种极低暗计数率单光子探测器。暗计数率作为单光子探测器的一个重要特征参数,决定了探测灵敏度。暗计数率在量子密钥分发实验中更是影响着传输的误码率。商用的硅单光子探测器的暗计数率一般都为几十赫兹到几千赫兹,如 PerkinElmer 公司生产的型号为 SPCM-AQR 的单光子探测器,且同等参数下,暗计数率很小的单光子探测器的价格会贵很多。随着使用年限的增加,雪崩二极管耗尽层中的杂质缺陷增加,往往会导致暗计数率逐渐增加。通过降低硅二极管的工作温度可以进一步降低单光子探测器的暗计数率,从而改善单光子探测性能^[12-19]。本文通过精确控制雪崩二极管的温度和偏置电压,可将探头温度最低降到 180 K,偏置电压的可调范围为 0~500 V。基于此,还研究了硅雪崩二极管探测器的暗计数率、探测效率及后脉冲概率与温度和偏置电压的关系。最终,将二极管的工作温度降低到 192 K,在保证探测效率为 50%的前提下,将一个工作温度为 274 K 的单光子探测器的暗计数率从 13900 Hz 降低为 14 Hz。将此方法应用于工作温度为 260 K,暗计数率为 58 Hz 的探测器上,该探测器的工作温度被降为 192 K 时,其暗计数率达到 0.064 Hz。本方法将硅单光子探测器的暗计数率降低了 3~4 个量级。

2 基本原理与方法

以 PerkinElmer 公司生产的型号为 SPCM-AQR 的单光子探测器内的雪崩二极管为对象,通过精准控制雪崩二极管的偏置电压和温度,有效降低单光子探测器暗计数率。图 1 为单光子探测器内雪崩二极管的外围电路模块的简化工程电路图,其中 AD5235 为数字电位器,其阻值可以被串行外设接口(SPI)通信控制。AD5235 中包含 2 个滑动变阻器,其中滑动电阻端口 6、7、8 及 9、10、11 分别对应 A1(初始端)、W1(滑动端口)、B1(终端)及 A2(初始端)、W2(滑动端口)、B2(终端),其余端口为通信设置端口、电源端口及保护端口。图 1 中虚线框(2)和数字电位器 AD5235 的 A2、W2、B2 三个端口为控温部分,半导体制冷器(TEC)和热敏电阻为探头部分的控温元件,与雪崩二极管一起被封装在探测模块中。只要使反馈回路中 A2、W2 两端口阻值与热敏电阻的阻值相同,就可以将雪崩二极管的温度稳定为热敏电阻对应的温度。图 1 中虚线框(1)为探测器输出模块和抑制电路的简化原理图,最终单光子探测器会输出一个电压幅值为 4.2 V,脉冲宽度为 27 ns 的信号,剩余电路为高压产生部分,为雪崩二极管提供 300 V 左右的高偏压。其中 EMCO 为高压输出模块,通过调节运算放大器(TLC2262)正相端的电压(即调节 AD5235 的 A1 和 W1 两端的电阻),控制高压电流模块(EMCO9546)的输出电压,输出电压为 0~500 V。雪崩二极管温控部分的热敏电阻的温度系数为 3694,可用于精确确定雪崩二极管处的温度。由于探头部分的二级铂耳贴制冷片能力有限,使用北京长流科学仪器公司的型号为 HX-405 的恒温循环水槽将探测器环境温度冷却到 243 K,最终通过内置的二级铂耳贴制冷片将雪崩二极管的温度冷却到 192 K。

对实验室现有的两个单光子探测器进行系统测试,其中第一个单光子探头(探头 1)的工作温度为 260 K,死时间为 28 ns,该探测器的暗计数率在使用过程中由几年前的 50 Hz 逐渐增加到现在的 8000 Hz,已经无法满足常规的单原子荧光探测需要。而第二个单光子探头(探头 2)是全新的,在工作温度为 260 K 时,暗计数率为 58 Hz,死时间为 28 ns,可以正常工作。本文研究了单光子探头的雪崩二极管的雪崩电压与温度的关系,并研究了在不同温度下的暗计数率随偏置电压的变化关系。同时,利用探测器输出信号自关联的方法测量了二极

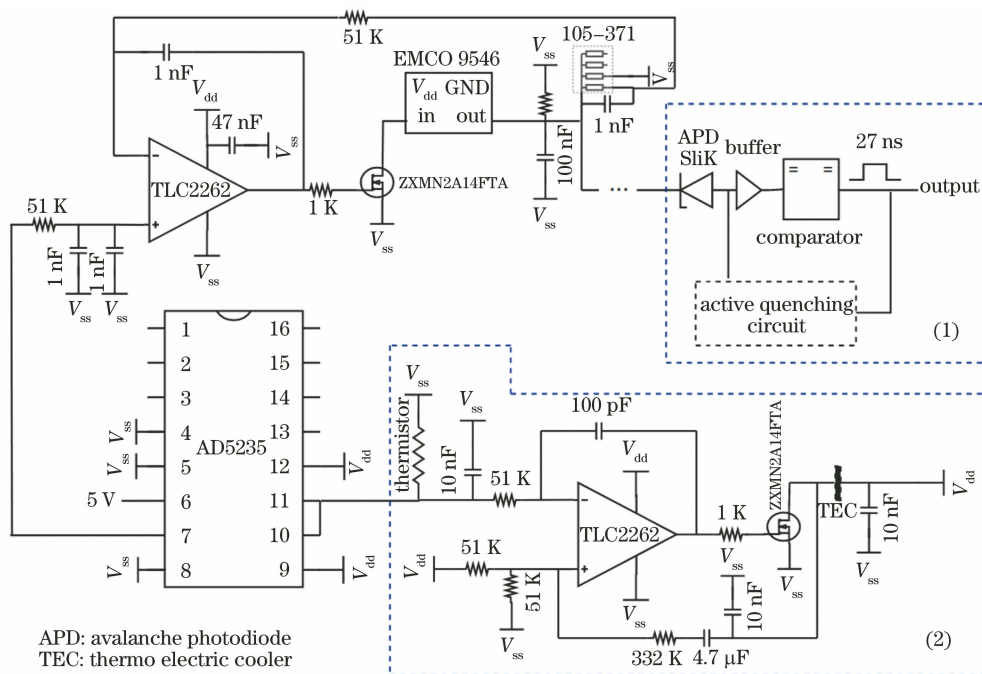


图 1 雪崩二极管外围电路模块的简化工程电路图

Fig. 1 Simplified engineering circuit diagram of avalanche diode peripheral circuit module

管的后脉冲概率。将一束光功率在皮瓦以下，波长为852 nm的相干光入射到单光子探测器中，调节单光子探测器的暗计数率使其约为 100 kHz，输出信号被一分为二，一路接入关联计数卡（型号为P7888,FAST ComTec GmbH 公司,德国）的开始（Start）端，另一路接入关联计数卡的停止（Stop）端。在前序脉冲产生过程中，二极管的 P 型半导体和 N 型半导体接触形成空间电荷区(PN 结)，在区域中的残余电荷再次引起雪崩效应，从而产生后脉冲，因此后脉冲与前序脉冲具有极强的关联性。而相干光光子是随机的，前后光子脉冲之间没有关联。故利用关联测量，可以将后脉冲计数挑选出来，并计算其产生概率。

3 测量结果与分析

雪崩电压是单个自由载粒子触发雪崩的最低电压，一般与雪崩二极管 PN 结内的材料有关，另外与温度也有一定关系。在碰撞电离过程中，当温度较低时，光生载流子碰撞晶格原子，受束缚的电子成为自由电子所需要的能量减小，雪崩电压也随之减小。图 2 是探头 1 的雪崩电压与温度的关系，雪崩电压随温度的降低呈线性减小，电压温度系数为 0.42 V/K。

暗计数率有很强的温度依赖性。一个单光子探测器的暗计数率主要由热噪声和后脉冲引起，为没

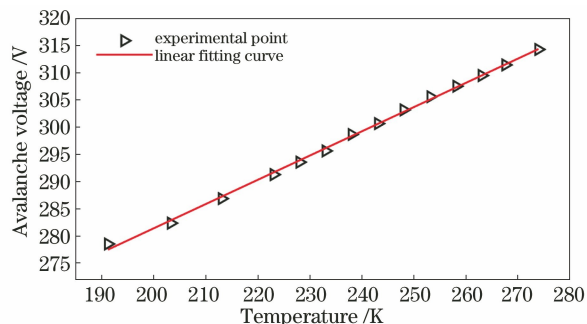


图 2 探头 1 雪崩电压随温度的变化图

Fig. 2 Avalanche voltage versus temperature for probe 1

有光子入射到雪崩二极管的感应面时单光子探测器的计数。热噪声是暗计数率的主要来源，服从玻尔兹曼分布，具有很强的温度依赖性，可以通过降低温度来减小单光子探测器的暗计数率。图 3 为不同温度下暗计数率与超出电压的关系。超出电压为在一定温度下雪崩二极管两端偏置电压与雪崩电压的差值。随着超出电压的增加，暗计数率先快速增加，然后较为平稳增长，后由于后脉冲概率急剧变大而迅速增加。单光子探测器通常在暗计数率平缓增长区域的中间偏上的位置工作，在平缓区域，探测效率较高，暗计数率和后脉冲概率小，供电电压对单光子探测器暗计数率影响很小。图 4 为雪崩二极管在超出电压为 13 V 工作时，暗计数率随温度的变化曲线，暗计数率随温度的减小而指数下降，温度每下降 8.58 K，暗计数率减小一半。低温下由热噪声引起

的暗计数率得到了抑制,且暗计数率随温度减小呈指数下降的现象与玻尔兹曼分布现象吻合,这也证实了热噪声是引起暗计数率的主要因素之一。引起暗计数率的另外一个重要因素是后脉冲概率。

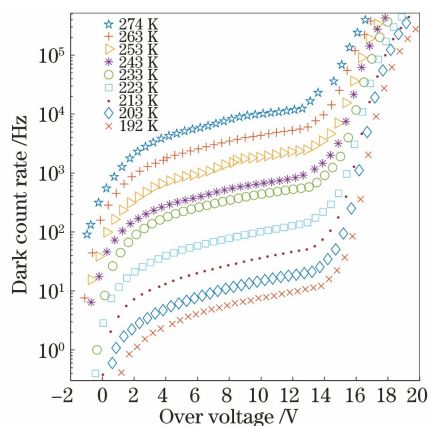


图 3 探头 1 在不同温度下的暗计数率随超出电压的变化
Fig. 3 Dark count rate versus over voltage for probe 1 at different temperatures

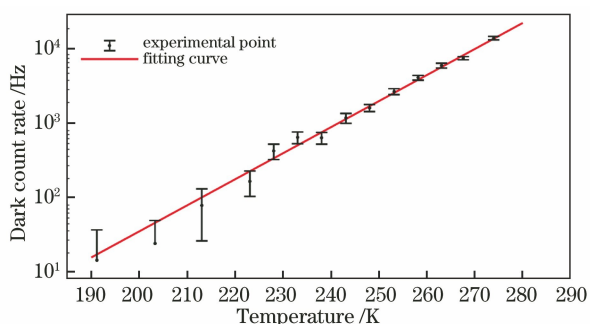


图 4 在超出电压为 13 V 时探头 1 暗计数率随温度的变化
Fig. 4 Dark count rate versus temperature for probe 1 at over voltage of 13 V

后脉冲概率对温度和偏置电压有很强的依赖性,雪崩二极管耗尽层在雪崩时俘获载流子,再将载流子释放,从而引起后脉冲。在雪崩发生时,耗尽层中的任何缺陷都有可能俘获载流子,并在接下来的任何时间内释放载流子。释放时刻与俘获的载流子的寿命有关,寿命越长,释放时刻越晚,寿命越短则释放过程越快。后脉冲计数是在死时间过后发生的,俘获的载流子再次被释放所造成的计数也属于暗计数率。因此,一个单光子探测器的后脉冲概率与俘获载流子的寿命有关,当单光子探测器的死时间一定时,寿命越长,后脉冲概率就越大。在一定的超出电压下,后脉冲概率随温度的降低而不断增加,这是由俘获载流子的寿命随温度的降低而增加导致的。同时在一定温度下,后脉冲概率随着偏置电压

的增加而增加,这是由于碰撞电离过程中自由电子在较大的偏置电压下获得的加速效果更加明显,发生雪崩的概率也变得更大,从而后脉冲概率变大。实验中测量了探头 1 在温度为 192 K 时,后脉冲概率随偏置电压的变化,如图 5 所示。可知,后脉冲概率随偏置电压的变化趋势与暗计数率随超出电压的变化趋势类似,即与暗计数率随偏置电压的变化趋势类似,后脉冲概率的增加会引起暗计数率的增加。在超出电压为 13 V 时,单光子探头 1 在温度为 260 K 时的后脉冲概率为 1.6%,相比温度为 192 K 时,后脉冲概率增加到了 6.6%。

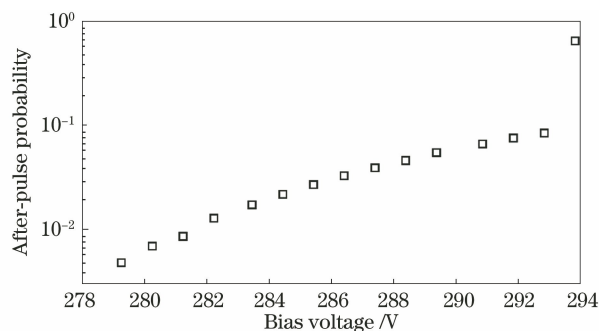


图 5 在温度为 192 K 时探头 1 后脉冲概率随偏置电压的变化
Fig. 5 After-pulse probability versus bias voltage for probe 1 at temperature of 192 K

以上结果表明,只要大幅降低雪崩二极管的温度,就可以有效降低暗计数率。实验中将工作温度为 260 K、暗计数率为 58 Hz、后脉冲概率为 2.2%、死时间为 28 ns 的雪崩二极管冷却到 192 K,测量了探头 2 暗计数率和后脉冲概率随偏置电压的变化关系,结果如图 6 所示。可以看出,此探头在温度为 192 K 时的性能比探头 1 好,当探头 2 的偏置电压为 362.5 V 时,测量得到探测效率为 50%,此时暗计数率仅为 0.064 Hz,后脉冲概率为 6.7%。

4 结 论

通过精确控制雪崩二极管的偏置电压,降低雪崩二极管的工作温度,在保证探测效率为 50%的前提下,实现了 0.064 Hz 的超低暗计数率,同时后脉冲概率有所增加。将这种方法应用于 PerkinElmer 生产的其他单光子探测模块中,这些模块的工作性能均得到有效提高,且温度特性类似。在实验中可以根据需求为单光子探测器选择合适的工作点。如探测单原子和弱光时,在保证极低暗计数率的前提下,较高的后脉冲概率反过来会增强信号,在工作点选择上应更加关心暗计数率;当单光子探测器用于

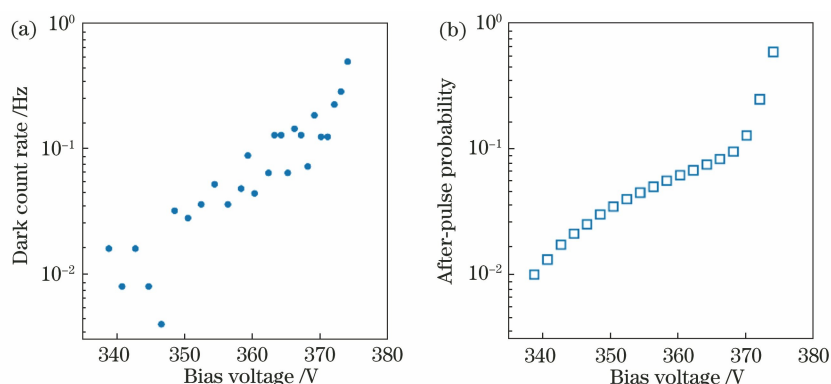


图 6 在温度为 192 K 时探头 2 参数间的关系。(a)暗计数率随偏置电压的变化;(b)后脉冲概率随偏置电压的变化

Fig. 6 Relation between parameters for probe 2 at temperature of 192 K. (a) Dark count rate versus bias voltage; (b) after-pulse probability versus bias voltage

量子通信时,后脉冲效应会使误码率提高,在保证较小暗计数率且探测器效率满足要求的前提下,应尽可能地提高雪崩二极管的工作温度以减小后脉冲概率。可以通过增加死时间来有效减小后脉冲概率。本方法简单可靠、成本低廉,能够有效降低硅单光子探测器的暗计数率,大幅提高单光子探测器的性能,拓展了超低暗计数率单光子探测器在精密测量、量子光学、量子信息、极弱光探测等领域中的应用。

参 考 文 献

- [1] Einstein A. On a heuristic point of view about the creation and conversion of light [J]. *Annalen der Physik*, 1905, 17(6): 132-148.
- [2] Sun X L, Dautet H. Proton radiation damage of Si APD single photon counters [C]//2001 IEEE Radiation Effects Data Workshop. NSREC 2001. Workshop Record. Held in conjunction with IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, July 16-20, 2001, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE, 2001: 146-150.
- [3] Denk W, Strickler J, Webb W. Two-photon laser scanning fluorescence microscopy[J]. *Science*, 1990, 248(4951): 73-76.
- [4] Holder J, Atkins R W, Badran H M, et al. The first VERITAS telescope [J]. *Astroparticle Physics*, 2006, 25(6): 391-401.
- [5] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 696-705.
- [6] Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: public-key distribution and tossing [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, December 10-12, 1984, Bangalore, India. New York: IEEE, 1984: 175-179.
- [7] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, et al. Quantum cryptography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74(1): 145-195.
- [8] Jin D. Fast convergent and secure key distribution protocols using a dual-quantum channel [D]. Oklahoma: University of Oklahoma, 2008.
- [9] Li Y, Li G, Zhang Y C, et al. Effects of counting rate and resolution time on a measurement of the intensity correlation function[J]. *Physical Review A*, 2007, 76: 013829.
- [10] Li Y, Li G, Zhang Y C, et al. The effect of counting rate and time resolution on the measured photon statistical properties: experimental study of direct measurement via SPCM [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(11): 5779-5783.
李园, 李刚, 张玉驰, 等. 计数率和分辨时间对光场统计性质测量的影响: 单探测器直接测量的实验分析[J]. *物理学报*, 2006, 55(11): 5779-5783.
- [11] Li Y, Zhang Y C, Zhang P F, et al. Experimental study on coherence time of a light field with single photon counting[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(7): 074205.
- [12] Hofbauer M, Steindl B, Zimmermann H. Temperature dependence of dark count rate and after pulsing of a single-photon avalanche diode with an integrated active quenching circuit in 0.35 μm CMOS [J]. *Journal of Sensors*, 2018, 2018: 1-7.
- [13] Acerbi F, Tosi A, Zappa F. Dark count rate dependence on bias voltage during gate-OFF in InGaAs/InP single-photon avalanche diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(18): 1832-1834.
- [14] Kim Y S, Jeong Y C, Sauge S, et al. Ultra-low noise single-photon detector based on Si avalanche

- photodiode [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(9): 093110.
- [15] Stipčević M. Active quenching circuit for single-photon detection with Geiger mode avalanche photodiodes [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(9): 1705-1714.
- [16] Korzh B, Zbinden H. Low temperature performance of free-running InGaAs/InP single-photon negative feedback avalanche diodes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9114: 91140O.
- [17] Stipčević M, Wang D Q, Ursin R. Characterization of a commercially available large area, high detection efficiency single-photon avalanche diode [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3591-3596.
- [18] Tosi A, Calandri N, Sanzaro M, et al. Low-noise, low-jitter, high detection efficiency InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 192-197.
- [19] Ziarkash A W, Joshi S K, Stipčević M, et al. Comparative study of after pulsing behavior and models in single photon counting avalanche photo diode detectors [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 5076.