

高时间稳定性的雪崩光电二极管单光子探测器*

张海燕¹⁾ 汪琳莉¹⁾ 吴琛怡¹⁾ 王煜蓉¹⁾ 杨雷¹⁾ 潘海峰¹⁾
刘巧莉²⁾ 郭霞²⁾ 汤凯³⁾ 张忠萍³⁾ 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) (北京邮电大学, 电子工程学院, 北京 100876)

3) (中国科学院, 上海天文台, 上海 200030)

(2019年12月11日收到; 2019年12月30日收到修改稿)

雪崩光电二极管单光子探测器是一种具有超高灵敏度的光电探测器件, 在远距离激光测距、激光成像和量子通信等领域有非常重要的应用. 然而, 由于雪崩光电二极管单光子探测器的雪崩点对工作温度高度敏感, 因此在外场环境下工作时容易出现增益波动, 继而导致单光子探测器输出信号的延时发生漂移, 严重降低了探测器的时间稳定性. 本文发展了一种稳定输出延时的方法, 采用嵌入式系统控制雪崩光电二极管, 使其处于恒定温度, 并实时补偿由环境温度引起的延时漂移, 实现了雪崩光电二极管单光子探测器的高时间稳定性探测. 实验中, 环境温度从 16 °C 变化到 36 °C, 雪崩光电二极管的工作温度稳定在 15 °C, 经过延时补偿, 雪崩光电二极管单光子探测器输出延时漂移小于 ± 1 ps, 时间稳定度达到 0.15 ps@100 s. 这项工作有望为全天候野外条件和空间极端条件下的高精度单光子探测应用提供有效的解决方法.

关键词: 单光子探测, 雪崩光电二极管, 时间稳定度, 延时漂移

PACS: 42.66.Lc, 85.30.-z, 42.60.Lh, 84.30.-r

DOI: 10.7498/aps.69.20191875

1 引言

单光子探测技术被广泛应用于激光测距、三维成像、激光通信、时间传递、量子通信和天文观测等诸多领域^[1-12]. 其中, 基于雪崩光电二极管 (avalanchephotodiode, APD) 的单光子探测器因量子效率高、工作波段宽、结构紧凑、室温工作等优点, 逐步发展成为应用最为广泛的单光子探测器. 但是 APD 器件的雪崩点对工作温度高度敏感, 使得雪崩增益随之发生变化^[13], 继而改变了单光子探测效率、暗计数、输出延时等重要指标和参数, 影响了 APD 单光子探测器的稳定性. 采用半导体

制冷将 APD 置于低于室温的恒温环境中^[14], 可明显改善单光子探测器的稳定性, 而且减小了暗计数. 另外, APD 单光子探测电路和外围控制电路也会受到环境温度影响, 由于电路面积远大于 APD 器件, 很难采用温控的方法一并解决电路的稳定性问题. 捷克技术大学的 Prochazka 研究小组在 APD 单光子探测器的时间稳定性和精度方面做了大量的工作, 在探测器的温度漂移补偿技术上取得了重要进展. 2013 年, 他们^[15]通过被动电路补偿的方法, 在 20—50 °C 的温度范围内标定了单光子探测器的输出延时与温度的关系为 280 fs/K. 2017 年, 他们^[16]优化了补偿电路, 使输出延时的温度变化低至 70 fs/K, 即在 20—50 °C 温度变化

* 国家自然科学基金 (批准号: 11774095, 11804099)、上海市科研计划项目 (批准号: 18JC1412200) 和国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2017YFF0104801) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gwu@phy.ecnu.edu.cn

范围内, 输出延时的总漂移量为 2.1 ps. 但是被动补偿电路只能在符合器件温度拐点的特定温度范围内实现补偿. 本文通过半导体制冷, 使 APD 工作在恒定的温度, 基于高精度的延时测量, 建立了 APD 探测电路延时随环境温度的变化关系, 通过在 APD 增益饱和区内微调 APD 的直流偏置电压, 实现了单光子探测器输出延时的高稳定性. 实验中, 环境温度从 16 °C 变化到 36 °C, 探测器的输出延时漂移小于 ± 1 ps.

2 低时间抖动 APD 单光子探测器

要实现高时间稳定性的单光子探测, 首先要实现低时间抖动的单光子探测. APD 单光子探测器的时间抖动由 APD 器件和探测电路两部分共同决定. 本文使用北京邮电大学自主研制的盖革 SiAPD 器件, 采用 CMOS 工艺制备 (其半导体结构如图 1 插图所示, 基于外延的平面 $n^+ - p - p^- - p^+$ 的 APD 结构, 感光面直径为 200 μm). 为了提高时间特性, 器件采用极薄的吸收层和雪崩增益层, 在盖革模式下, 雪崩增益层的电场超过 10^5 V/cm, 加速了载流子输运过程, 减小了 Si APD 器件雪崩过程的时间抖动.

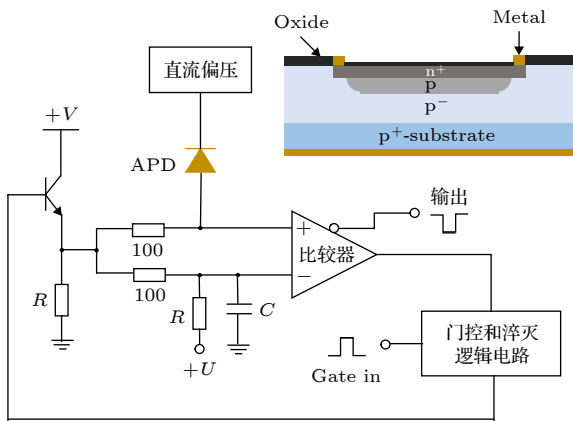


图 1 APD 单光子探测电路原理图, 插图为盖革模式 Si APD 器件半导体结构
Fig. 1. Schematic of APD single-photon detection circuit, in which the illustration is the semiconductor structure of the Geiger-mode Si APD.

APD 单光子探测电路如图 1 所示, 本文在 Prochazka 等 [15–17] 的方案的基础上进行了优化, 采用高速比较器直接甄别 APD 的雪崩脉冲, 获得了输出信号. 通过“门控和淬灭逻辑电路”的控制, APD 阳极的电平通过开关三极管迅速拉高,

APD 雪崩得到快速抑制. 比较器采用差分输入, 可以有效抵消抑制脉冲产生的共模信号. 同时, 甄别电平输入端通过对地电容, 对交流输入信号积分, 当抑制脉冲加载到比较器两端时, 经过设定的积分时间以后, 甄别输入端的电平提升, 使得比较器输出翻转, 决定了输出信号的脉冲宽度. 对于探测电路而言, 抑制雪崩脉冲幅度涨落是实现低时间抖动的关键. 恒比鉴别电路是抑制脉冲涨落的传统技术 [18,19], 但是该技术受限于电路器件性能, 通常只

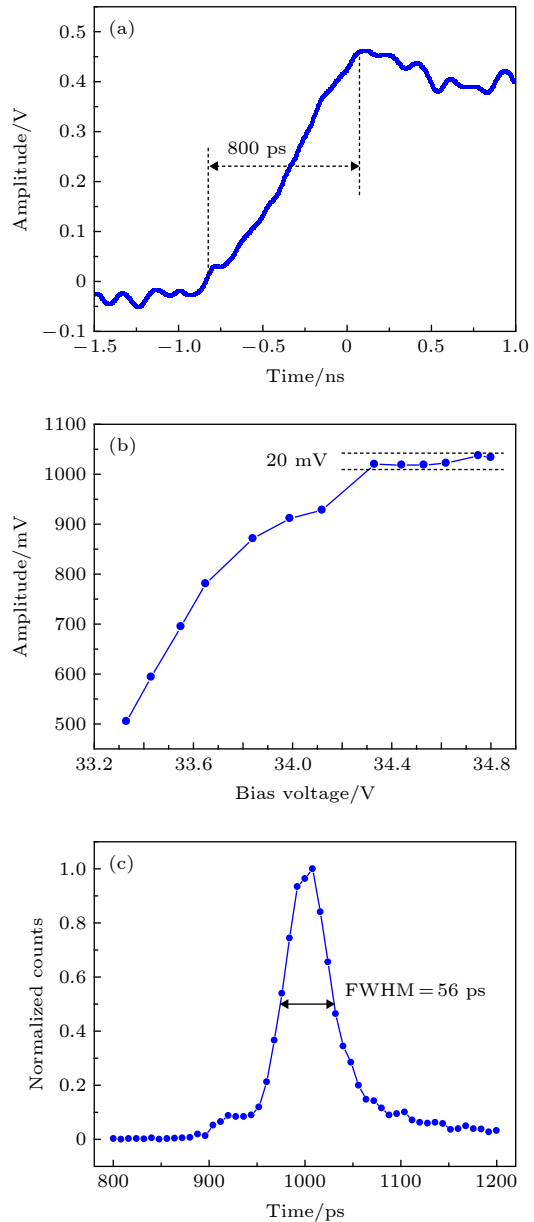


图 2 (a) 雪崩脉冲上升沿波形; (b) 雪崩脉冲幅度均值随偏置电压变化曲线; (c) APD 单光子探测器时间抖动
Fig. 2. (a) The waveform of the rising edge of the avalanche pulse; (b) the curve of the mean amplitude of the avalanche pulses with the bias voltage; (c) the time jitter of the APD single-photon detector.

能补偿到 100 ps 量级, 并且电路复杂. 本文通过对 SiAPD 器件特性进行分析, 得到 SiAPD 的雪崩脉冲上升沿速率约为 1.7 ns/V (图 2(a)). 为了获得高探测效率, SiAPD 器件工作在盖革模式下的增益饱和区内. 图 2(b) 给出了雪崩脉冲幅度均值随偏置电压的变化曲线, 增益饱和区域内雪崩脉冲幅度变化趋于平坦, 峰峰值变化小于 20 mV, 结合雪崩脉冲上升沿速率, 可以估算出在整个增益饱和区内, 脉冲幅度变化引起的时间抖动小于 8 ps, 因此本文采用直接甄别的方法. 时间抖动测试中, 采用 532 nm 脉冲激光, 脉冲宽度为 28 ps, 经过衰减后照射到 SiAPD 靶面, 使得单光子探测器的计数率为 0.1, 输出信号作为计时器 (HydraHarp400) “stop” 信号, 激光脉冲的同步信号作为计时器 “start” 信号, 计时器分辨率设置为 1 ps, 测试得到单光子探测器的时间抖动全幅半高宽 (full width at halfmaximum, FWHM) 为 56 ps, 如图 2(c) 所示, 实现了低时间抖动单光子探测, 为高时间稳定性打下了基础.

3 APD 单光子探测器输出延时稳定与补偿

APD 单光子探测器的输出延时主要有以下 3 个影响因素: 1) APD 器件内部载流子的渡跃时间; 2) 雪崩脉冲甄别时刻的变化; 3) 比较器等探测电路的延时漂移. 在 APD 内部, 载流子的渡跃时间随着电场的增加而减小 [20]. 所以, 在恒定温度下, 提高 APD 的偏置电压会减小探测器的输出延时. 恒定温度下, 雪崩增益会随着 APD 的偏置电压提高而增大, 使得雪崩脉冲幅度随之增大, 输出延时减小. 探测电路的传输延时也会随温度发生变化, 主要来自比较器的传输延时, 探测电路中使用的高速比较器为 ADCMP553, 其传输延时随温度的变

化率为 0.25 ps/K.

综上分析, 温度变化是探测器输出延时漂移的主要来源, 环境温度发生变化, APD 雪崩点也会变化, 进而引起延时漂移, 同时探测器的探测效率和暗计数等关键性能指标也会大幅发生变化, 所以本文通过温控的方法稳定 SiAPD 器件的温度. 如图 3 所示, SiAPD 器件贴在三级半导体制冷片 (thermoelectric cooler, TEC) 冷面, 真空密封在 TO-8 管壳内, 光信号通过增透玻璃窗片入射到 APD 靶面. TEC 热面通过管壳底座固定在铝合金探测器外壳上散热. 冷面与热面均贴有温度传感器, 通过可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 板卡采集. 温度控制电路采用 Xilinx 的 ARTIX-7 系列的 FPGA, 使用比例-积分-微分 (proportion integration differentiation, PID) 算法, 控制 TEC 电流, 令 SiAPD 器件处于恒定的低温下, 稳定精度优于 ± 0.1 °C.

不同于 SiAPD 器件, 整个探测电路由于分布面积大, 很难通过温控的方法抑制这部分延时漂移. 本文通过偏压补偿的方法补偿整个探测电路的延时漂移. 由图 2(b) 可知, SiAPD 在增益饱和区域内, 脉冲幅度和探测性能变化很小. 因此, 通过微调 SiAPD 偏置电压, 可以精确地补偿探测电路的延时漂移, 实现输出延时稳定的高精度单光子探测. 如图 3 所示, FPGA 采集冷面温度, 使用 PID 算法控制 SiAPD 器件温度, 同时采集探测器外壳温度, 即探测电路所处的环境温度, 作为偏压补偿的依据. 实验对探测器的输出延时进行标定, 精确测量每个温度段的延时漂移, 通过查表的方式设置相应的补偿电压, 实现探测电路的漂移补偿. 其中, 延时的测量精度决定了最终的补偿效果. 本文采用事件计时器, 测得分辨率为 13 ps, 精度为 8 ps, 经过多次累计测量, 延时均值的测量精度为 0.3 ps.

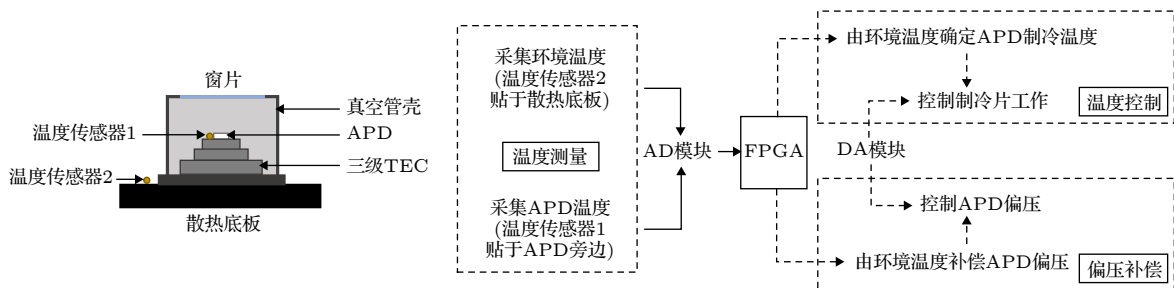


图 3 基于 FPGA 板卡的温度控制和偏压补偿示意图

Fig. 3. Schematic of temperature control and bias voltage compensation based on the FPGA board.

实验测试 SiAPD 偏置电压与输出延时的变化关系, SiAPD 器件在温度控制电路作用下处于恒定温度 15 °C, 控制环境温度稳定在 ± 1 °C 以内, 在增益饱和区域内选取 7 个偏置电压值, 每个电压采集 186 个延时数据, 计算出各个电压点的延时分布的峰值中心, 如图 4 所示, 线性拟合后得到延时-偏压变化系数为 175.3 ps/V.

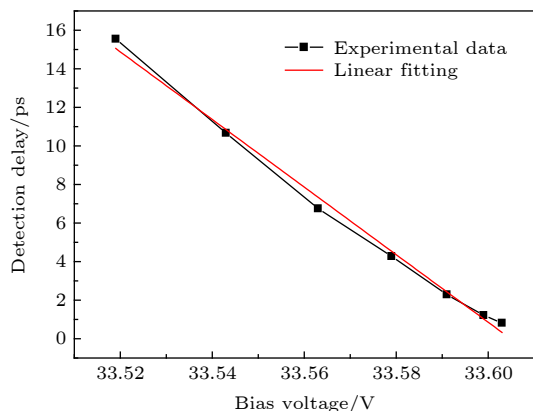


图 4 输出延时随 Si APD 偏置电压变化曲线

Fig. 4. The curve of the detection delay with the bias voltage of the Si APD.

实验选取增益饱和区内的中间偏置电压值作为 Si APD 的初始偏置电压值, 控制环境温度缓慢升高, 实时测量探测器的输出延时值, 同时采集环境温度, 获取输出延时与环境温度的对应数据. 根据实验数据计算全部输出延时的均值作为补偿基准, 实验中每个温度点累计测量 5000 个延时值, 通过计算得到每个温度点对应的输出延时均值, 根据延时-偏压变化系数, 计算出补偿所需的偏置电压, 完成 APD 单光子探测器的输出延时补偿.

4 单光子探测器时间稳定性测试

本文测试了 APD 单光子探测器的时间稳定性, 实验测试了在环境温度变化情况下, 探测器的输出延时稳定性. 实验中, 测试温度范围是 16—36 °C, Si APD 器件的制冷温度为 15 °C, 初始偏置电压为 33.56 V. 测试过程中, 环境温度从 16 °C 缓慢升高至 36 °C, 温度变化率为升高 0.75 K/min. APD 单光子探测器的计数率保持在 0.1 附近, 同时采集输出延时和环境温度, 得到输出延时与环境温度的变化曲线. 如图 5(a) 中黑色曲线所示, 在没有偏置电压补偿之前, 探测器的输出延时漂移约为 ± 10 ps. 在偏置电压补偿之后, 输出延时漂移在 ± 1 ps 以

内 (图 5(b)). 在图 5(a) 中, 蓝色曲线为补偿后的延时数据, 与未补偿的数据相比, 极大地提高了探测器输出延时的时间稳定性.

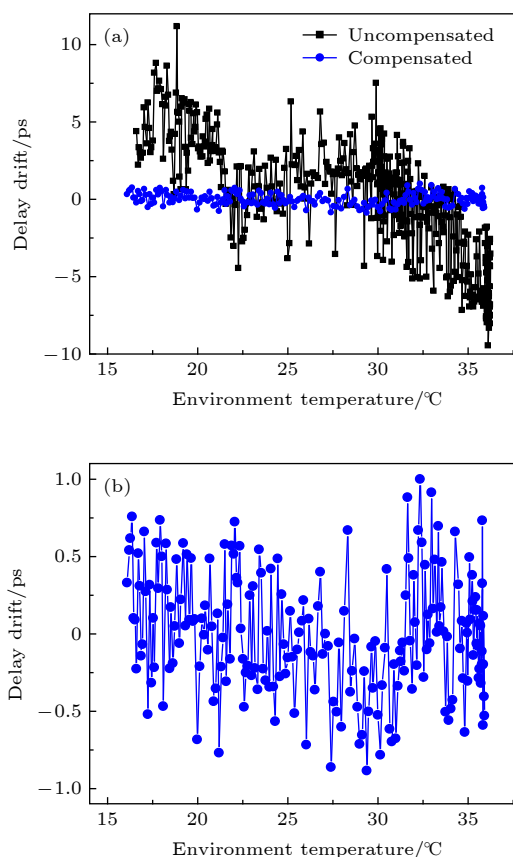


图 5 环境温度为 16 °C-36 °C 所对应的延时漂移 (a) 偏置电压补偿前后延时漂移; (b) 偏置电压补偿后延时漂移

Fig. 5. The delay drift as a function of the environment temperature from 16 °C to 36 °C: (a) The delay drift before and after the compensation by the bias voltage; (b) the delay drift after the compensation by the bias voltage.

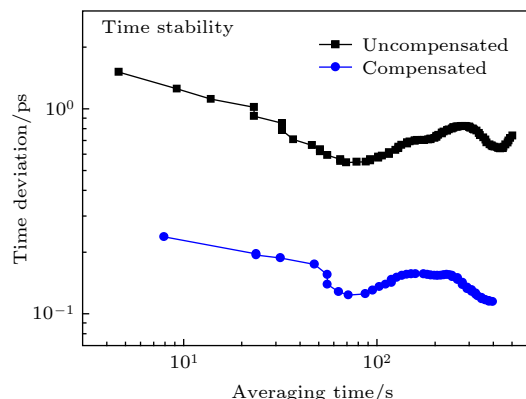


图 6 偏置电压补偿前后, APD 单光子探测器的时间稳定性对比图

Fig. 6. Comparison diagram of time deviation of the APD single-photon detector before and after the compensation by the bias voltage.

本文对 APD 单光子探测器进行了时间稳定度 (time deviation, TDEV) 分析. 实验中, 环境温度从 16 °C 逐渐升温到 36 °C, 分别测试了偏置电压补偿前后 APD 单光子探测器对应的实时输出延时, 并进行了时间稳定度分析. 如图 6 所示, 偏置电压补偿前, APD 单光子探测器的输出延时稳定度为 0.6 ps@100 s; 偏置电压补偿后, APD 单光子探测器的输出延时稳定度提升为 0.15 ps@100 s, 表明探测器的时间稳定性有了明显的提高.

5 结 论

本文介绍了一种具有高时间稳定性的 APD 单光子探测技术, 在 SiAPD 器件温控的基础上, 选择在 SiAPD 盖革模式增益饱和区内微调偏置电压, 补偿探测电路随环境温度变化引起的输出延时漂移, 极大地提高了 APD 单光子探测器的时间稳定性, 在 16—36 °C 温度范围内的输出延时漂移仅为 ± 1 ps, 100 s 内的时间稳定度达到 0.15 ps. 该技术采用嵌入式系统, 参数调节灵活, 并且不受探测电路芯片温度与延时变化特性的限制^[15–17], 另外, 可以通过测试更大温度范围内各个温度点的延时补偿量, 实现更大环境温度范围内的稳定输出, 满足外场和空间环境下的卫星激光测距和星地激光脉冲时间传输测量的需求.

参考文献

- [1] Ren M, Gu X R, Liang Y, Kong W B, Wu E, Wu G, Zeng H P 2011 *Opt. Express* **19** 13497
- [2] Zhang Z P, Zhang H F, Wu Z B, Li P, Meng W D, Chen J P, Pang Y 2014 *Chinese J. Lasers* **41** s108005-1 (in Chinese) [张忠萍, 张海峰, 吴志波, 李朴, 孟文东, 陈菊平, 庞毓 2014 *中国激光* **41** s108005-1]
- [3] Meng W D, Tang K, Deng H R, Li P, Zhang H F, Wu Z B, Zhang Z P 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** s112006 (in Chinese) [孟文东, 汤凯, 邓华荣, 李朴, 张海峰, 吴志波, 张忠萍 2015 *光学学报* **35** s112006]
- [4] Zheng T X, Shen G Y, Li Z H, Yang L, Zhang H Y, Wu E, Wu G 2019 *Photonics Res.* **7** 1381
- [5] Du B C, Wang Y, Wu E, Chen X L, Wu G 2018 *Opt. Commun.* **426** 89
- [6] Li Z H, Wu E, Pang C K, Du B C, Tao Y L, Peng H, Zeng H P, Wu G 2017 *Opt. Express* **25** 10189
- [7] Meng W D, Zhang H F, Huang P C, Wang J, Zhang Z P, Liao Y, Ye Y, Hu W, Wang Y M, Chen W Z, Yang F M, Prochazka I 2013 *Adv. Space Res.* **49** 80
- [8] Warburton R E, McCarthy A, Wallace A M, Hernandez-Marin S, Buller G S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2266
- [9] Hadfield R H 2009 *Nat. Photonics* **3** 696
- [10] Kong H J, Kim T H, Jo S E, Oh M S 2011 *Opt. Express* **19** 19323
- [11] Garipey G, Tonolini F, Henderson R, Leach J, Faccio D 2016 *Nat. Photonics* **10** 23
- [12] Meng W D, Zhang H F, Deng H R, Tang K, Wu Z B, Wang Y R, Wu G, Zhang Z P, Yang X Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 019502 (in Chinese) [孟文东, 张海峰, 邓华荣, 汤凯, 吴志波, 王煜蓉, 吴光, 张忠萍, 陈欣扬 2020 *物理学报* **69** 019502]
- [13] Feng J Y, Chen H J, Li L X, Gong W 2006 *Opt. Techn.* **32** 237 (in Chinese) [冯金垣, 陈红娟, 李丽秀, 龚雯 2006 *光学技术* **32** 237]
- [14] Qi S S, Zhang T S, Fu Y B, Wang H X, Lü L H 2016 *Chinese J. Quantum Elect.* **3** 81 (in Chinese) [亓少帅, 张天舒, 付毅宾, 王欢雪, 吕立慧 2016 *量子电子学报* **3** 81]
- [15] Prochazka I, Kodet J, Blazej J 2013 *Rev. Sci. Instrum.* **84** 046107
- [16] Prochazka I, Kodet J, Eckl J, Blazej J 2017 *Rev. Sci. Instrum.* **88** 106105
- [17] Prochazka I, Blazej J, Kodet J 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 056106
- [18] Paulus T J 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **32** 1242
- [19] Hansang L 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 2351
- [20] Jhee Y, Campbell J, Ferguson J, Dentai A, Holden W 1986 *IEEE J. QuantumElect.* **22** 753

Avalanche photodiode single-photon detector with high time stability*

Zhang Hai-Yan¹⁾ Wang Lin-Li¹⁾ Wu Chen-Yi¹⁾ Wang Yu-Rong¹⁾
Yang Lei¹⁾ Pan Hai-Feng¹⁾ Liu Qiao-Li²⁾ Guo Xia²⁾
Tang Kai³⁾ Zhang Zhong-Ping³⁾ Wu Guang^{1)†}

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

2) (*School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

3) (*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

(Received 11 December 2019; revised manuscript received 30 December 2019)

Abstract

Avalanche photodiode single-photon detector is one of the ultra-sensitivity photoelectric detector, which has important applications in the fields of long-distance laser ranging, laser imaging, and quantum communication. However, due to the high temperature sensitivity of the avalanche voltage, the avalanche photodiode single-photon detector is prone to fluctuation of the avalanche gain when it works in the field environment, which leads to the delay drift and seriously reduces the time stability. In this paper, we proposed a method of stabilizing the delay of the single-photon detector. An embedded system was used to control avalanche photodiode at constant low temperature and compensate the delay drift of the detection circuit caused by the change of environment temperature in real time. A high time stability avalanche photodiode single-photon detector was realized by this method. In the experiment, the environment temperature changed from 16 °C to 36 °C, and the avalanche photodiode was controlled at 15 °C. After compensation, the delay drift of the avalanche photodiode single-photon detector was within ± 1 ps, and the time deviation was 0.15 ps@100 s. This work is expected to provide an effective solution for the application of high-stability single-photon detector in the field and space environment.

Keywords: single-photon detection, avalanche photodiode, time deviation, delay drift

PACS: 42.66.Lc, 85.30.-z, 42.60.Lh, 84.30.-r

DOI: 10.7498/aps.69.20191875

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11774095, 11804099), the Shanghai Basic Research Project, China (Grant No. 18JC1412200), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFF0104801).

† Corresponding author. E-mail: gwu@phy.ecnu.edu.cn