

# 实时锁定 1550 nm 单光子线偏振态\*

于波<sup>1)†</sup> 银振强<sup>2)3)4)5)</sup> 丁伟杰<sup>1)</sup> 翟荣荣<sup>1)</sup> 张宏<sup>1)</sup>

1) (忻州师范学院物理系, 忻州 034000)

2) (中国科学技术大学, 中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026)

3) (中国科学技术大学, 量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 合肥 230026)

4) (中国科学技术大学, 合肥国家实验室, 合肥 230088)

5) (中国科学技术大学, 量子网络安徽省重点实验室, 合肥 230026)

(2025 年 8 月 6 日收到; 2025 年 9 月 28 日收到修改稿)

针对环境扰动引起单光子偏振态随机漂移的问题, 本文提出了一种实时锁定 1550 nm 单光子线偏振态的实验系统. 通过使用单光子偏振调制技术操控偏振旋转器实时锁定任意 1550 nm 单光子线偏振态到同轴检偏器的光轴方向, 在 2000 s 内单光子偏振漂移限制在 0.0011 rad 以内, 这种具有稳定线偏振态的 1550 nm 单光子脉冲可以直接用作偏振编码或相位编码量子密钥分发系统的单光子源.

**关键词:** 偏振锁定, 单光子偏振调制, 线偏振态

**PACS:** 42.25.Ja, 42.60.Fc, 14.70.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.74.20251055

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251055

## 1 引言

量子密钥分发的安全性由量子力学的基本原理保证, 密钥与一次一密加密方式相结合可以实现信息论层面保证的安全通信<sup>[1,2]</sup>, 因此量子密钥分发受到广泛关注. 高偏振稳定性单光子脉冲直接意味着量子密钥分发系统具有更低的固有量子比特误码率和更高的安全密钥率, 也能简化复杂的实时偏振反馈校准, 减少通信中断, 降低系统复杂度和安全风险, 能够维持系统更长时间的稳定工作, 从而增强系统的实用性<sup>[3-5]</sup>. 对于偏振编码量子密钥分发, 一般使用单光子线偏振态和圆偏振态量子比特<sup>[6-8]</sup>, 而且当线偏振态方向与 1/4 波片的  $o$  轴或  $e$  轴成 45° 角对齐时, 线偏振态穿过 1/4 波片可以产生圆偏振态, 因此偏振编码量子密钥分发系

统需要单光子具有稳定的线偏振态. 对于相位编码量子密钥分发, 要求两个单光子信号的线偏振态必须实时对齐从而达到高的单光子干涉可见度<sup>[9-11]</sup>. 但是在实际环境中由于单模光纤的双折射效应会引起偏振态随机变化, 从而导致量子比特误码率变大, 所以对于偏振编码量子密钥分发和相位编码量子密钥分发, 保持单光子线偏振态的稳定具有重要的意义.

单光子偏振控制通常分为被动控制和主动控制两种方式. 对于被动单光子偏振控制, 通常采用控制温度或隔离振动等方法来抑制偏振态漂移, 然而这些方法不能从根本上消除偏振态漂移. 对于主动单光子偏振控制, 通常使用遗传算法<sup>[12,13]</sup>、粒子群算法<sup>[14,15]</sup>、模拟退火算法<sup>[15,16]</sup>、爬山算法<sup>[16]</sup>等各种搜索算法<sup>[17-19]</sup>操纵多通道偏振控制器进行偏振补偿, 但是搜索算法进行多通道控制时由于过程复

\* 山西省基础研究计划 (批准号: 202403021211084) 和忻州市科技计划项目 (批准号: 20240509) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yb@xztu.edu.cn

杂导致耗时较长,在恶劣环境下无法实时补偿单光子偏振态的随机漂移.基于光子计数方法对单光子强度和参考强度进行差分运算生成误差信号,通过控制单通道偏振旋转器可以将任意方向线偏振态锁定到设定方向,具有操作简单和锁定速度快等特点,此时光子计数的信噪比(SNR)为  $SNR = N/\sqrt{N} = \sqrt{N}$ ,其中  $N$  是单光子平均计数,其与积分时间成正比<sup>[20-22]</sup>,然而积分时间越长则锁定精度越低导致偏振锁定的稳定性越差,不适用于实时锁定单光子偏振态的场合.

本文设计了一种实时锁定 1550 nm 单光子线偏振态的实验系统.使用单光子偏振调制技术结合相敏检测技术有效抑制了系统噪声的影响,提高了单光子计数的信噪比,利用误差信号动态控制偏振旋转器将任意 1550 nm 单光子线偏振态实时锁定到同轴检偏器的光轴方向.

## 2 单光子偏振调制技术原理

单光子偏振调制技术通过快速调制单光子线偏振态的偏振方向,并在窄滤波带宽内进行同频率解调产生相应的误差信号,滤除滤波带宽以外的噪声信号,提高了单光子计数的信噪比<sup>[20,21]</sup>.这项技术分为 4 个步骤.

第 1 步是快速调制单光子线偏振态的偏振方向,当加载高频调制信号到偏振控制器件进行周期性调制单光子线偏振态时,单光子线偏振态相对于偏振参考的瞬时方向表示为

$$p(t) = p_0 + m \cos(2\pi ft + \theta), \quad (1)$$

式中,  $p_0$  是偏振态相对于偏振参考的初始方向,  $m$  是偏振调制幅度,  $f$  是偏振调制频率,  $\theta$  是偏振调制相位.

第 2 步是将单光子偏振调制转换为单光子计数调制.偏振调制的单光子信号通过偏振参考透射输出时,单光子偏振调制转换为单光子计数调制,此时单光子的计数率表示为

$$r(t) = r_0 + a \cos(2\pi ft + \theta), \quad (2)$$

式中,  $r_0$  是单光子的平均探测概率,  $a$  是偏振调制深度.在采样时间  $T$  内,单光子的有效计数率表示为

$$r_T(t) = r_0 + a \left[ \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T} \right] \cos(2\pi ft + \pi f T + \theta). \quad (3)$$

可以看到单光子的有效计数率也被周期性调制.对单光子信号进行光电探测后单光子信号转换为晶体管-晶体管逻辑(TTL)脉冲输出,那么 TTL 脉冲的时域分布包含同频率调制信息.

第 3 步是通过同频率解调 TTL 脉冲生成误差信号.锁相放大器对单光子信号进行相敏检测,即对 TTL 脉冲进行同频率混频和低通滤波处理,解调信号的信噪比为

$$SNR = \frac{S}{(N_s + N_b)(\Delta f / f_n)}, \quad (4)$$

式中,  $S$  为 TTL 脉冲对应的模拟信号强度,  $N_s$  为散粒噪声,  $N_b$  为背景噪声,  $\Delta f$  为滤波带宽,  $f_n$  为噪声分布带宽.通过快速调制单光子线偏振态并且使用相敏检测直接解调偏振调制频率处对应的 TTL 脉冲,可以有效抑制系统噪声进而改善单光子计数的信噪比,最终得到对应的误差信号.

第 4 步是锁定单光子线偏振态.误差信号经过伺服系统优化后加载到偏振控制器件,通过连续调节线偏振态实时对齐偏振参考方向,使单光子计数率保持最大化,即实现了单光子线偏振态的实时锁定.

## 3 实验

实时锁定 1550 nm 单光子线偏振态的实验装置如图 1 所示.1550 nm 光纤激光器(NKT Photonics, Koheras AdjustiK E15)输出线偏振激光信号,激光强度经过衰减器降低到单光子水平,强度调制器将连续的单光子信号斩为离散的单光子脉冲,偏振旋转器(BATI, PRM)用于将输入线偏振态旋转到任意方向输出.

函数发生器(RIGOL, DG5252)输出一路 10 MHz TTL 脉冲到强度调制器的射频端口,强度调制器的直流端口始终设置在最小传输点,用于将连续光斩成 10 MHz 重复频率的脉冲光,函数发生器输出另一路延迟的 10 MHz TTL 脉冲用于触发工作在盖革模式下的单光子探测器.另一台函数发生器(RIGOL, DG4202)输出 10 Hz 斜坡信号用于缓慢扫描单光子线偏振态,锁相放大器(SRS, SR830)的参考通道输出 5 kHz 高频正弦波信号用于快速调制单光子线偏振态,有效避免了系统低频闪烁噪声的影响,上述斜坡信号和正弦波信号通过两个自制的加法器加载到放大器从而驱动偏振旋转器工作.当调制的单光子脉冲通过同轴检偏器

(Thorlabs, ILP1550PM-APC) 时, 单光子偏振调制转换为单光子探测概率调制, 单光子探测器对单光子脉冲进行光电转换输出相应的 TTL 脉冲, 锁相放大器对 TTL 脉冲进行相敏检测后输出误差信号, 误差信号通过伺服系统 (SRS, SIM960) 进行优化, 最后关闭斜坡信号并将伺服信号加载到偏振旋转器, 即可将单光子线偏振态实时锁定到同轴检偏器的光轴方向.

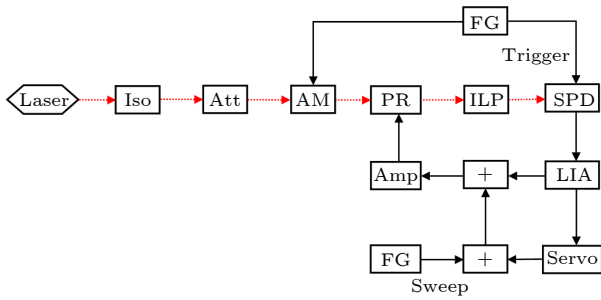


图 1 实时锁定 1550 nm 单光子线偏振态的实验装置 (红色虚线代表光信号, 黑色实线代表电信号), 其中 Iso 为隔离器; Att 为衰减器; AM 为强度调制器; PR 为偏振旋转器; ILP 为同轴检偏器; SPD 为单光子探测器; FG 为函数发生器; LIA 为锁相放大器; Amp 为放大器

Fig. 1. Experimental setup of real-time locking the 1550 nm single-photon linear polarization state (red dashed lines for the light signal, black solid lines for the electrical signal), where Iso represents isolator; Att represents attenuator; AM represents amplitude modulator; PR represents polarization rotator; ILP represents in-line polarizer; SPD represents single-photon detector; FG represents function generator; LIA represents lock-in amplifier; Amp represents amplifier.

## 4 结果和讨论

马吕斯定律表明线偏振光经过检偏器后的输出强度表示为  $p = p_{in} \cos^2 \varphi$ , 其中  $P_{in}$  是输入线偏振光强度,  $\varphi$  是输入线偏振光偏振方向与检偏器光轴方向之间的夹角. 图 2 为线性扫描输入线偏振态通过同轴检偏器的透射信号, 透射信号的峰值点意味着输入线偏振态对齐同轴检偏器的光轴方向, 透射信号最大幅度的一半表示线偏振态的偏振方向与同轴检偏器光轴方向的夹角为  $\pm\pi/4$  rad, 透射信号的强度分布特性与马吕斯定律吻合良好.

锁相放大器用于提取以调制频率为中心的窄滤波带宽内调制单光子脉冲的幅度和相位信息, 滤除滤波带宽以外的噪声信号, 从而提高单光子计数的信噪比. 实验中设定锁相放大器的时间常数为

1 ms, 滤波器斜率为 24 dB, 对应的滤波带宽为 78.1 Hz. 锁相放大器对偏振调制的单光子脉冲进行相敏检测后, 输出的误差信号如图 3 所示, 误差信号的信噪比为 20, 误差信号的零点表示单光子线偏振态对齐同轴检偏器的光轴方向, 误差信号零点左右两侧区域的幅度相反, 意味着零点周围两侧偏振调制响应的相位差为  $\pi$ , 当单光子线偏振态方向与同轴检偏器光轴方向的夹角在  $-1.57-0$  rad 时, 误差信号幅度为正, 当单光子线偏振态方向与同轴检偏器光轴方向的夹角在  $0-1.57$  rad 时, 误差信号幅度为负, 因此该误差信号可用于锁定单光子线偏振态到同轴检偏器的光轴方向. 误差信号的两个拐点对应于单光子线偏振态方向相对于同轴检偏器光轴方向的夹角为  $\pm\pi/4$  rad, 在误差信号的零点附近为线性区域, 线偏振态角度与误差信号幅度的线性对应关系为 1.267 rad/V, 因此误差信号幅度也可以用于表征偏振态的漂移范围.

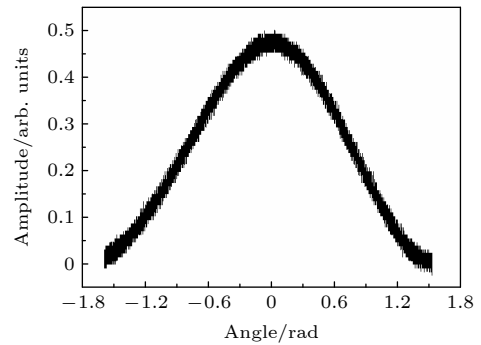


图 2 透射信号

Fig. 2. Transmission signal.

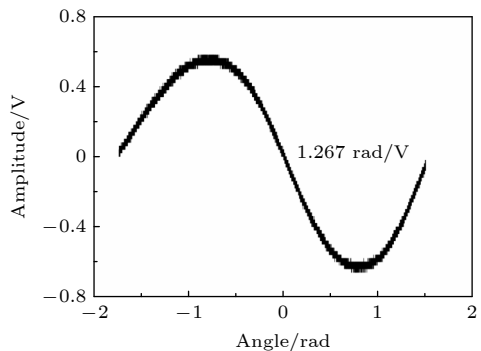


图 3 误差信号

Fig. 3. Error signal.

单光子偏振态未锁定和锁定的测量结果如图 4 所示. 从图 4(a) 可以看到未锁定单光子偏振

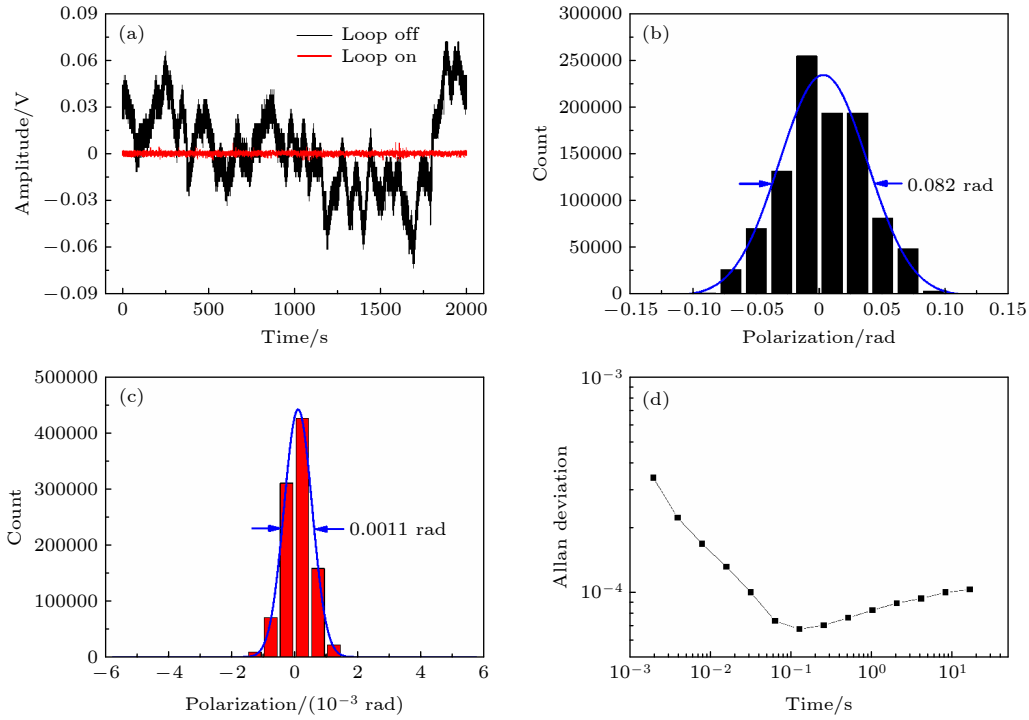


图 4 (a) 单光子偏振态未锁定和锁定的测量结果; (b) 单光子偏振态未锁定时误差信号的统计结果; 单光子偏振态锁定时误差信号的统计结果 (c) 和对应的阿伦偏差分析结果 (d)

Fig. 4. (a) Measurement results of unlocked and locked single-photon polarization states; (b) statistics results of error signal for unlocked single-photon polarization state; statistics results of error signal for locked single-photon polarization state (c) and corresponding analysis results of Allan deviation (d).

态时, 单光子偏振态呈现出明显的随机漂移, 然而当锁定单光子偏振态时, 负反馈回路有效地抑制了单光子偏振态的随机抖动. 对未锁定偏振态时的误差信号数据进行统计分析并使用高斯函数拟合, 结果如图 4(b) 所示, 相应的半高全宽为 0.082 rad, 这意味着由于机械振动和温度漂移等随机噪声的影响, 单光子脉冲的偏振漂移为 0.082 rad. 同样对锁定偏振态时的误差信号进行统计分析并使用高斯函数拟合, 结果如图 4(c) 所示, 可以看到相应的半高全宽仅为 0.0011 rad, 这表明通过偏振旋转器实时调节线偏振态方向, 在 2000 s 内单光子脉冲的偏振漂移限制在 0.0011 rad 以内, 而且即使受到额外环境噪声的干扰, 负反馈回路对环境噪声也具有鲁棒性, 它可以实时补偿单光子偏振态的无规则抖动. 为了评估偏振锁定系统的长期稳定性, 针对偏振锁定后的误差信号进行阿伦偏差分析, 如图 4(d) 所示, 在积分时间较短时阿伦偏差随积分时间变大成比例下降, 说明这段时间内白噪声占主导地位, 当积分时间为 128 ms 时阿伦偏差达到最小值  $6.7 \times 10^{-5}$ , 此时锁定系统达到最佳稳定状态, 之后阿伦偏差逐渐变大, 说明长期漂移影响开始占

主导地位.

## 5 结 论

本文验证了一种实时锁定 1550 nm 单光子线偏振态的实验系统, 使用单光子偏振调制技术操控偏振旋转器实时锁定 1550 nm 单光子线偏振态到同轴检偏器的光轴方向, 在 2000 s 内单光子脉冲的偏振漂移限制在 0.0011 rad 以内. 单光子偏振调制技术具有以下优点: i) 在单光子量级实现了实时跟踪补偿线偏振态漂移; ii) 将单频率偏振调制扩展到多频率偏振调制可以实现同时锁定多个单光子线偏振态; iii) 具有 0.0011 rad 线偏振态稳定性的 1550 nm 单光子脉冲可以直接用作偏振编码或相位编码量子密钥分发系统中的单光子源.

## 参考文献

- [1] Xu F H, Ma X F, Zhang Q, Lo H K, Pan J W 2020 *Rev. Mod. Phys.* **92** 025002
- [2] Portmann C, Renner R 2022 *Rev. Mod. Phys.* **94** 025008
- [3] Li Y, Li Y H, Xie H B, Li Z P, Jiang X, Cai W Q, Ren J G, Yin J, Liao S K, Peng C Z 2019 *Opt. Lett.* **44** 5262
- [4] Stein A, Grande I H L, Castelvero L, Pruneri V 2023 *Opt.*

*Express* **31** 13700

- [5] Wang Z X, Xu H X, Li J, Yu H C, Huang J Q, Han H, Wang C L, Zhang P, Yin F F, Xu K, Liu B, Dai Y T 2025 *EPJ Quantum Technol.* **12** 47
- [6] Tang Z Y, Liao Z F, Xu F H, Qi B, Qian L, Lo H K 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 190503
- [7] Yin J, Li Y H, Liao S K, Yang M, Cao Y, Zhang L, Ren J G, Cai W Q, Liu W Y, Li S L, Shu R, Huang Y M, Deng L, Li L, Zhang Q, Liu N L, Chen Y A, Lu C Y, Wang X B, Xu F H, Wang J Y, Peng C Z, Ekert Artur K, Pan J W 2020 *Nature* **582** 501
- [8] Chen Y A, Zhang Q, Chen T Y, Cai W Q, Liao S K, Zhang J, Chen K, Yin J, Ren J G, Chen Z, Han S L, Yu Q, Liang K, Zhou F, Yuan X, Zhao M S, Wang T Y, Jiang X, Zhang L, Liu W Y, Li Y, Shen Q, Cao Y, Lu C Y, Shu R, Wang J Y, Li L, Liu N L, Xu F H, Wang X B, Peng C Z, Pan J W 2021 *Nature* **589** 214
- [9] Tang Y L, Yin H L, Zhao Q, Liu H, Sun X X, Huang M Q, Zhang W J, Chen S J, Zhang L, You L X, Wang Z, Liu Y, Lu C Y, Jiang X, Ma X F, Zhang Q, Chen T Y, Pan J W 2016 *Phys. Rev. X* **6** 011024
- [10] Liu Y, Zhang W J, Jiang C, Chen J P, Zhang C, Pan W X, Ma D, Dong H, Xiong J M, Zhang C J, Li H, Wang R C, Wu J, Chen T Y, You L, Wang X B, Zhang Q, Pan J W 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 210801
- [11] Zhu H T, Huang Y Z, Pan W X, Zhou C W, Tang J J, He H, Cheng M, Jin X D, Zou M, Tang S B, Ma X F, Chen T Y, Pan J W 2024 *Optica* **11** 883
- [12] Mamdoohi G, Abas A F, Samsudin K 2012 *Eng. Appl. Artif. Intell.* **25** 869
- [13] Liu L L, Jing M Y, Yu B, Hu J Y, Xiao L T, Jia S T 2015 *Laser Optoelectron. Prog.* **52** 072701 (in Chinese) [刘令令, 景明勇, 于波, 胡建勇, 肖连团, 贾锁堂 2015 *激光与光电子学进展* **52** 072701]
- [14] Xi L X, Zhang X G, Tian F, Tang X F, Weng X, Zhang G Y, Li X X, Xiong Q J 2010 *IEEE Photon. J.* **2** 195
- [15] Asgari H, Khodabandeh M, Hajibaba S, Dadahkhani A H, Madani S A 2025 *Indian J. Phys.* **99** 1471
- [16] Tang P Y, Li G C, Gao S, Yu G, Dai Y Q, Xiang Y, Li D D, Zhang Y H, Wu B, Zhao Z Y, Gao D Q, Liu J H, Wang J 2018 *Acta Opt. Sin.* **38** 0106005 (in Chinese) [唐鹏毅, 李国春, 高松, 余刚, 代云启, 相耀, 李东东, 张英华, 吴冰, 赵子岩, 高德荃, 刘建宏, 王坚 2018 *光学学报* **38** 0106005]
- [17] Li P C, Liu K, Jiang J F, Pan L, Ma P F, Li Z C, Zhang S, Li X, Liu T G 2018 *Chin. J. Lasers* **45** 0510002 (in Chinese) [李鹏程, 刘琨, 江俊峰, 潘亮, 马鹏飞, 李志辰, 张昭, 李鑫, 刘铁根 2018 *中国激光* **45** 0510002]
- [18] Ma B B, Ke X Z, Zhang Y 2019 *Chin. J. Lasers* **46** 0106002 (in Chinese) [马兵斌, 柯熙政, 张颖 2019 *中国激光* **46** 0106002]
- [19] Xia Q, Zhang T, Liu J, Yang J, He Y H, Huang W, Li D S, Xu B J 2020 *Acta Opt. Sin.* **40** 1526001 (in Chinese) [夏筹, 张涛, 刘金璐, 杨杰, 何远杭, 黄伟, 李大双, 徐兵杰 2020 *光学学报* **40** 1526001]
- [20] Huang T, Dong S L, Guo X J, Xiao L T, Jia S T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061102
- [21] Wang J J, He B, Yu B, Liu Y, Wang X B, Xiao L T, Jia S T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 204203 (in Chinese) [王晶晶, 何博, 于波, 刘岩, 王晓波, 肖连团, 贾锁堂 2012 *物理学报* **61** 204203]
- [22] Lounis B, Orrit M 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 1129

# Real-time locking of 1550 nm single-photon linear polarization state\*

YU Bo<sup>1)†</sup> YIN Zhenqiang<sup>2)3)4)5)</sup> DING Weijie<sup>1)</sup>

ZHAI Rongrong<sup>1)</sup> ZHANG Hong<sup>1)</sup>

1) (*Department of Physics, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China*)

2) (*CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

4) (*Hefei National Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230088, China*)

5) (*Anhui Province Key Laboratory of Quantum Network, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

( Received 6 August 2025; revised manuscript received 28 September 2025 )

## Abstract

The key security of quantum key distribution (QKD) is guaranteed by the basic principle of quantum mechanics, which makes it possible to combine information theory security communication with one-time encryption. The key is usually encoded on the polarization dimension or phase dimension of a single-photon. It is considered that the birefringence effect of single-mode fiber leads to a random variation of polarization state, which would induce the bit error rate. So it is of great significance to keep the single-photon linear polarization state stable for both polarization encoding QKD system and phase encoding QKD system. By using the single-photon polarization modulation technology, the single-photon linear polarization state periodically varies with the external modulation signal. The flicker noise is suppressed effectively, and the signal-to-noise ratio (SNR) of single-photon counting is increased as indicated by the phase-sensitive detection with a lock-in amplifier (LIA). The error signal is generated by demodulating the modulated single photons and it is used to lock an arbitrary 1550 nm single-photon linear polarization state to the optical axis of in-line polarizer (ILP). The modulation frequency reaches up to 5 kHz, which can eliminate the influence of low frequency flicker noise. The LIA demodulates the single-photon pulses by using 78.1 Hz filter bandwidth, with a time constant of 1 ms and a filter slope of 24 dB. The SNR of error signal is 20. The zero-crossing point of error signal represents the single photon's linear polarization state aligned to the optical axis of ILP. The linear slope around the zero-crossing point for the polarization state angle versus the error signal amplitude is 1.267 rad/V. When the negative feedback loop does not work, the polarization drift of single-photon pulses is 0.082 rad due to the random environmental noise. However, by using the single-photon polarization modulation technology, the polarization drift of stable single-photon pulses is limited to 0.0011 rad within 2000 s through the precise control with a polarization rotator, and the corresponding Allan deviation reaches the minimal value of  $6.7 \times 10^{-5}$  at an integration time of 128 ms. The advantages for the single-photon polarization modulation technology are as follows: i) the linear polarization state drift is compensated in real-time at the single-photon level; ii) single frequency polarization modulation can be extended to multiple frequency polarization modulation in order to achieve simultaneous locking of multiple linear polarization states of single-photon pulses; iii) these 1550 nm single-photon pulses with the 0.0011 rad linear polarization state stability can be directly used as the single-photon source in either polarization encoding or phase encoding QKD system.

**Keywords:** polarization locking, single-photon polarization modulation, linear polarization state

**PACS:** 42.25.Ja, 42.60.Fc, 14.70.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.74.20251055

**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251055

\* Project supported by the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202403021211084) and the Science & Technology Program of Xinzhou City, China (Grant No. 20240509).

† Corresponding author. E-mail: [yb@xztu.edu.cn](mailto:yb@xztu.edu.cn)



实时锁定1550 nm单光子线偏振态

于波 银振强 丁伟杰 翟荣荣 张宏

Real-time locking of 1550 nm single-photon linear polarization state

YU Bo YIN Zhenqiang DING Weijie ZHAI Rongrong ZHANG Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 234201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251055

CSTR: 32037.14.aps.74.20251055

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251055>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于单光子计数反馈的低噪声光纤信道波分复用实时偏振补偿系统

Real-time polarization compensation system for wavelength division multiplexing in low noise fiber channel based on single photon counting feedback

物理学报. 2022, 71(13): 130306 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220120>

高效、偏振不敏感超导纳米线单光子探测器

High-efficiency polarization-insensitive superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2021, 70(18): 188501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210486>

基于线性光学元件的偏振-时间超纠缠W态浓缩

Hyperentanglement W state concentration for polarization-time-bin photon systems with linear optics

物理学报. 2025, 74(13): 130302 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241642>

近红外波长处金星(盘)线偏振度的敏感性分析

Sensitivity analysis of Venus (disk) linear polarization at near-infrared wavelengths

物理学报. 2025, 74(9): 094201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250015>

增益开关线偏振单频脉冲光纤激光器

Gain switched linearly polarized single-frequency pulsed fiber laser

物理学报. 2022, 71(19): 194204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220829>

基于种子脉冲预整形的130  $\mu$ J线偏振单频12  $\mu$ m纤芯铒镱共掺光纤激光器

130  $\mu$ J linear-polarized single-frequency 12- $\mu$ m-core Er/Yb co-doped fiber amplifier based on pre-shaped seed pulse

物理学报. 2025, 74(2): 024201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241371>