

doi:10.3788/gzxb20174603.0304001

基于相关光子的单光子探测器量子效率测量系统

史学舜^{1,2}, 刘长明¹, 赵坤¹, 陈海东¹

(1 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

(2 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘 要: 为准确测量近红外波段单光子探测器量子效率, 搭建了基于自发参量下转换效应的测量系统. 系统利用中心波长为 518 nm 的脉冲激光泵浦周期极化磷酸氧钛钾晶体, 通过自发参量下转换过程产生相关光子对, 分别测量了 Si 和 InGaAs 雪崩光电二极管单光子探测器在 778 nm 和 1 550 nm 波长点的量子效率, 并对测量不确定度进行了分析. 实验表明, 该装置可以测量近红外单光子探测器量子效率参量, 测量不确定度均优于 1%.

关键词: 量子光学; 量子效率测量; 自发参量下转换; 相关光子; 单光子探测器

中图分类号: O437; O432

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0304001-6

Measurement System for Quantum Efficiency of the Single Photon Detector Based on Correlated Photons

SHI Xue-shun^{1,2}, LIU Chang-ming¹, ZHAO Kun¹, CHEN Hai-dong¹

(1 The 41st Research Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266555, China)

(2 Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract: The measurement facility based on parametric down-conversion technique was established to measure the quantum efficiency of the near-infrared band single-photon detector. The correlated photons were generated via spontaneous parametric down-conversion in a periodically poled potassium titanyl phosphate crystal pumped by a 518 nm picosecond laser. The detection efficiency of Si-avalanche photodiode and InGaAs-avalanche photodiode single-photon detectors were measured via correlated photon pairs at 778 nm and 1 550 nm, respectively, and the measurement uncertainty was analyzed. The experiment results indicated that the facility can measure near infrared single-photon detectors quantum efficiency with 1% measurement uncertainty.

Key words: Quantum optics; Quantum efficiency measurement; Spontaneous parametric down-conversion; Correlated photons; Single-photon detector

OCIS Codes: 040.5570; 040.1880; 190.4975; 270.5570

0 引言

单光子探测器具有超灵敏度的探测能力, 能够探测、识别和提取湮没在噪声中的极微弱光信号. 目前, 单光子探测技术在量子通信^[1-2]、激光测距和空间遥感^[3]、激光雷达^[4]、天文学^[5]、单分子探测、荧光显微^[6]等领域有着广泛的应用. 这些应用中需要确定单光子探测器量子效率这一基本参量. 单光子探测器量子效率的测量有激光衰减法和相关光子法两种. 前者将强激光衰减到单光子水平, 测量激光功率以及衰减倍数, 进而得到单光子探测器的量子效率; 后者通常是指利用参量下转换方法产生相关光子实现量子效率的测量. 美国

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2015AA123702)、国家技术基金项目 (No. J312012B001) 和电子测试技术重点实验室基金 (No. 9140C120302150C12058) 资助

第一作者: 史学舜 (1975-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为光辐射测量及光电探测器参数计量技术. Email: xshshi@163.com

收稿日期: 2016-08-15; **录用日期:** 2016-11-24

<http://www.photon.ac.cn>

NIST^[7]的 Polyakov 等利用参量下转换定标方法和传统定标方法获得的测量不确定度分别为 0.18% (包含因子 $k=1$) 和 0.17% ($k=1$), 通过多次比对测量发现, 两种方法的一致程度达到 0.14%; 英国 NPL^[8] 对利用相关光子法标定探测器量子效率的主要不确定度来源进行了分析; 法国 INM^[9] 利用相关光子法建立了适用于极微弱光测量的标准探测器装置; 意大利 IEN^[10] 的 Brida 研究小组分别利用相关光子法和激光衰减法进行了对比研究, 实验结果表明两种方法的一致性达到 0.2%. 国内中科院物理所^[11] 提出了一种无需参考探测器的单光子探测器“自定标”方案; 中科院安徽光机所基于参量下转换开展了光电倍增管 (Photomultiplier, PMT) 量子效率的定标等相关研究^[12-13]. 中国电科第 41 所把相关光子光源的波长拓展到近红外量子通信波段, 利用波长为 778 nm 和 1 550 nm 的相关光子源测量了 Si 和 InGaAs 雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 单光子探测器的量子效率^[14]. 本文在前期研究的基础上进一步对测量系统的原理和构成, 泵浦光强对符合计数的影响, 测量不确定度等方面进行了详细分析.

1 测量原理及系统构成

光学参量下转换现象是在一定条件下, 用抽运激光照射某些晶体时, 晶体中会同时成对辐射出具有方向、波长、偏振相关特性的光子. 此过程满足能量和动量守恒定律, 即

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_i \quad (2)$$

式中 $\omega_{(p,s,i)}$ 为频率, $K_{(p,s,i)}$ 为晶体内的波矢, 脚标 p, s, i 分别对应抽运、信号和闲频光. 此过程表明在某一个方向观察到一个光子 (信号光子) 就意味着在它的共轭方向上存在另一个光子 (空闲光子), 这是利用相关光子法测量单光子探测器量子效率的物理机理所在.

本文设计的实验测量系统如图 1, 518 nm 的倍频激光作为自发参量下转换的泵浦源, 产生波长为

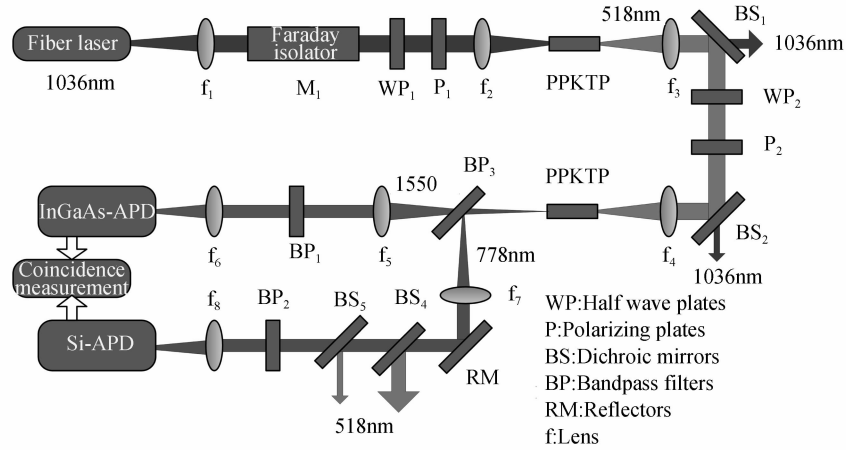


图 1 量子效率测量系统构成示意图

Fig. 1 Diagram of the quantum efficiency measurement system

778 nm 闲频光和 1 550 nm 信号光的双光子源, 双光子经过分光、滤波后被对应的单光子探测器接收. 两个单光子探测器的计数 N_{InGaAs} 和 N_{Si} 分别为

$$N_{\text{InGaAs}} = \tau_{1550} \eta_{\text{InGaAs}} N \quad (3)$$

$$N_{\text{Si}} = \tau_{778} \eta_{\text{Si}} N \quad (4)$$

式中, τ_{1550} 为晶体与 InGaAs 单光子探测器之间光路的总透过率, η_{InGaAs} 为 InGaAs 单光子探测器的量子效率, τ_{778} 为晶体与 Si 单光子探测器之间光路的总透过率, η_{Si} 为 Si 单光子探测器的量子效率. 将两个单光子探测器的输出信号输入符合测量系统, 测量两个单光子探测器的符合计数. 符合计数即为某一时间点同时检测到两个探测器输出信号的概率, 即

$$N_c = \tau_{1550} \eta_{\text{InGaAs}} \tau_{778} \eta_{\text{Si}} N \quad (5)$$

利用式 (3)~(5), 可以得到两个单光子探测器的量子效率分别为

$$\eta_{\text{Si}} = \frac{N_c}{\tau_{778} \times N_{\text{InGaAs}}} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{InGaAs}} = \frac{N_c}{\tau_{1550} \times N_{\text{Si}}} \quad (7)$$

根据式(6)、(7),只要测量出单路计数概率、相关事件的符合计数概率以及双光子通道的总透射率,就可以对测量单光子探测器的量子效率 η_{InGaAs} 和 η_{Si} ,而且两个单光子探测器量子效率的测量互不相关,彼此没有影响。

图1为量子效率测量系统构成示意图,其中, M_1 为法拉第隔离器, WP_1 、 WP_2 分别为1 036 nm和518 nm的半波片, P_1 、 P_2 为格兰棱镜, BP_1 、 BP_2 分别为1 550 nm和778 nm波段附近带通滤波器, BS_1 、 BS_2 、 BS_3 、 BS_4 、 BS_5 为双色片, f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 、 f_6 、 f_7 、 f_8 为透镜。图1所示测量系统中光纤激光器的输出激光经过准直透镜 f_1 进行准直,依次通过法拉第隔离器 M_1 , 格兰棱镜 P_1 后变为线偏振光。半波片 WP_1 与格兰棱镜 P_1 组合用来调节1 036 nm基频光的入射光强。基频光经透镜 f_2 聚焦之后,入射倍频晶体 PPKTP 产生518 nm倍频光,透镜 f_3 用于准直基频光和倍频光。双色片 BS_1 、 BS_2 用于滤除光路中的1 036 nm基频光。半波片 WP_2 和格兰棱镜 P_1 用于调节518 nm泵浦光功率。518 nm的激光经过聚焦透镜 f_4 后进入参量下转换晶体周期极化磷酸氧钛钾(Periodically Poled Potassium Titanyl Phosphate, PPKTP)。双色片 BS_3 (截止波长:1 180 nm)用于分离相关光子对。1 550 nm信号光经透镜 f_5 准直、带通滤波片 BP_1 滤波后,经透镜 f_6 聚焦入射 InGaAs-APD。InGaAs-APD 作为待测探测器时 BP_1 带宽为12 nm,作为触发探测器时 BP_1 带宽为0.8 nm。778 nm闲频光经透镜 f_7 准直、反射镜 RM 反射后依次经过 BS_4 、 BS_5 双色片和带通滤波片 BP_2 ,最后经透镜 f_8 聚焦入射 Si-APD。双色片 BS_4 、 BS_5 (截止波长:567 nm)用于滤除518 nm泵浦光。Si-APD 作为待测探测器时 BP_2 带宽为10 nm,作为触发探测器时 BP_2 带宽约为1.5 nm。PPKTP 晶体既具有较大的有效非线性系数,破坏阈值又是PPLN晶体的10倍左右,因此综合几种晶体的各项特性参量,倍频过程选择 PPKTP 晶体。位相匹配条件可以表示为

$$\frac{2\pi n(\lambda/2, T)}{\lambda/2} = 2 \times \frac{2\pi n(\lambda, T)}{\lambda} + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (8)$$

式中, λ 为基频光的中心波长, n 为 KTP 晶体的折射率, T 为晶体温度, Λ 为晶体的极化周期。根据式(8)及折射率公式,就可以计算出 PPKTP 晶体的极化周期和温度,实验中使用温控炉精确控制晶体温度。1 036 nm激光泵浦 PPKTP 晶体产生518 nm激光,文献[15]对倍频过程中的温度特性作了相关研究。

由于 PPKTP 晶体的有效非线性系数、破坏阈值等各项性能参量优异,因此选择 PPKTP 作为自发参量下转换晶体。本实验中非线性晶体采用周期性极化的 PPKTP 晶体,晶体中位相匹配条件为

$$\frac{2\pi n(\lambda_p, T)}{\lambda_p} = \frac{2\pi n(\lambda_s, T)}{\lambda_s} + \frac{2\pi n(\lambda_i, T)}{\lambda_i} + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (9)$$

式中, λ_p 、 λ_s 和 λ_i 分别为泵浦光、信号光和闲频光的中心波长, n 为 KTP 晶体的折射率, T 为晶体的温度, Λ 为晶体的极化周期。根据式(9)晶体折射率公式,就可以计算出用于自发参量下转换 PPKTP 晶体的极化周期和温度,实验中使用温控炉精确控制晶体温度。

2 符合测量实验

最常用的符合测量方法是采用时间幅度转换器(Time-to-Amplitude Converter, TAC)以及多道分析仪(Multi-Channel Analyzer, MCA)组合来获取双光子符合时间谱。本文使用 Ortec 公司的延时模块 425,时间幅度转换器 567 模块和双通道计数器 994 模块搭建了测量系统。为了抑制噪声的影响,提高符合计数与非符合计数的比值,连续改变泵浦光光强,得到符合计数与非符合计数的比值变化情况,如图2。随着泵浦光光强的提高,符合计数与非符合计数之间的比值逐渐降低,这说明泵浦光光强的提高,使得光路中噪声的影响增大,从而使非符合计数

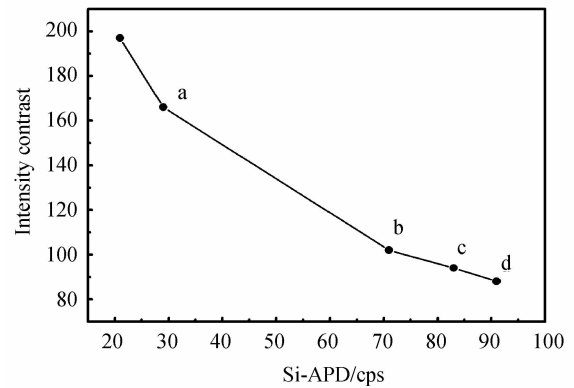


图2 符合计数与非符合计数的比值随 Si 单光子探测器计数值的变化
Fig. 2 The curve of ratios of coincidence to non-coincidence counting with counting rate of Si-APD

值越来越大.在量子效率测量过程中,既要保持一定的泵浦光强度,同时尽量保持符合计数与非符合计数之间的比值约 100 : 1,尽量降低噪声对符合计数的影响.

3 单光子探测器量子效率测量

根据相关光子法测量原理,需要测量从晶体到单光子探测器光路的整体透过率,两路相关通道主要有双色片、准直透镜、反射镜、聚焦透镜(光纤)和窄带滤波片,利用导入外部光源的方法进行测量.实验中测得的从下转换晶体到 Si 之间的光路的总透过率为 38.6%,从下转换晶体到 InGaAs 之间的光路的总透过率为 32.1%.

在系统测控软件^[16]控制下,对单光子探测器量子效率进行了测量实验.将自发参量下转换过程的泵浦光功率调节到 15 μ W, Si 单光子探测器计数值为 91.5 k/s, InGaAs 单光子探测器的计数值为 3.6 k/s.此时,用遮光板挡住泵浦激光,读取 Si 单光子探测器背景噪声的计数值为 0.5 k/s, InGaAs 单光子探测器背景噪声的计数值为 1 k/s.光路透过率 τ_{780} 和 τ_{1550} 已经进行了测量,因此只需分别测量两个单光子探测器计数 N_{Si} 、 N_{InGaAs} 以及符合计数值 N_C ,得到 N_C/N_{Si} 和 N_C/N_{InGaAs} 即可求出单光子探测器的量子效率.为了提高测量的准确度,实验中在光路中引入衰减倍数连续可调的衰减片,改变单光子探测器接收到的光子流速率,测量多个数据点的符合计数,用多个点拟合直线的斜率来确定 N_C/N_{Si} 和 N_C/N_{InGaAs} 的值.

首先以 InGaAs 单光子探测器作为参考,测量 Si 单光子探测器在 778 nm 波长点的量子效率, Si 单光子探测器工作于自由运转模式,本征死时间 19.9 ns.在 InGaAs 单光子探测器前放置衰减倍数可调的衰减片,改变 InGaAs 单光子探测器接收到的光子数,测得相关光子的计数速率与 InGaAs 单光子探测器计数速率的变化关系如图 3.

在测量过程中,选取 60s 作为计数时间,一共记录了 8 个数据点的 N_C/N_{InGaAs} 值.对图 3 中的 8 个数据点进行拟合,得到的拟合直线的斜率为 0.249.数据点与拟合直线的斜率之间的标准偏差为 9.6×10^{-4} .根据式(6),计算可得 Si 单光子探测器在 778 nm 波长点的量子效率为 64.5%.为了验证用相关光子法测量单光子探测器量子效率方法的准确性,以 Si 探测器厂家 Excelitas Technologies 给出量子效率光谱响应曲线作为参考,可知 Si 在 778 nm 波长点量子效率典型值为 64%.实验测量结果与厂家给出的典型值之间相对误差约为 0.8%,具有较好的一致性.

同理,以 Si 单光子探测器作为参考,测量 InGaAs 单光子探测器在 1550 nm 波长点的量子效率,工作于外触发门控模式,不设置死时间.在 Si 单光子探测器前放置衰减片,改变 Si 单光子探测器接收到的光子数,测得相关光子的计数速率与 Si 单光子探测器计数速率的变化关系如图 4.在测量过程中,选取 60s 作为计数时间,一共记录了 8 个数据点的 N_C/N_{Si} 值.对这 8 个数据点进行拟合,得到的拟合直线的斜率为 0.006 97.数据点与拟合直线的斜率之间的标准偏差为 7.1×10^{-5} .根据式(7),计算可得

InGaAS 单光子探测器在 1550 nm 波长点的量子效率为 2.2%.

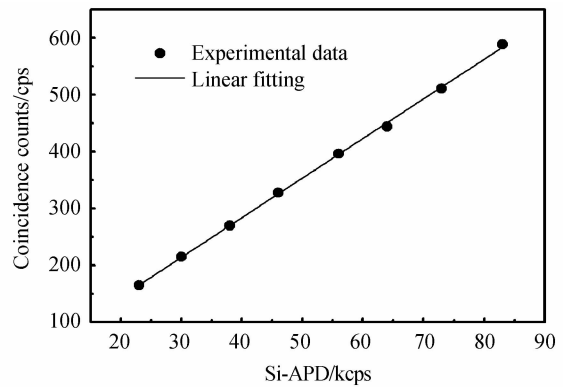


图 3 相关计数与 Si 单光子探测器计数速率的变化关系
Fig. 3 The coincidence counting as a function counting rate of Si single-photon detectors

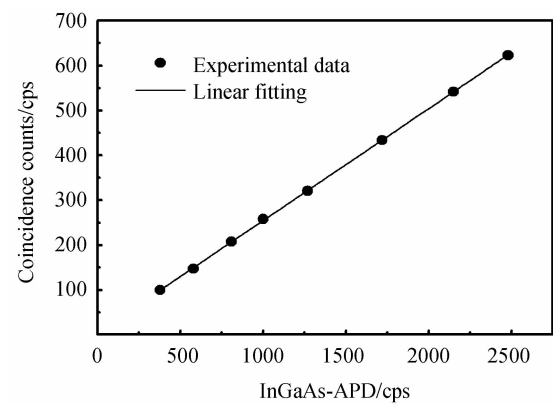


图 4 相关计数与 InGaAs 单光子探测器计数速率的变化关系
Fig. 4 The coincidence counting as a function counting rate of InGaAs single-photon detectors

4 测量不确定度分析

本实验中单光子探测器量子效率测量结果的不确定度分量主要包括窄带滤波片透过率测量不确定度、光路中其他光学器件透过率测量不确定度、单光子探测器计数的不确定度以及符合计数的不确定度。相关光子法的量子效率测量的相对合成标准不确定度可以表示为

$$U_{\eta} = \sqrt{U_{BP}^2 + U_P^2 + U_S^2 + U_C^2 + U_D^2 + U_A^2} \quad (10)$$

式中, U_{BP} 为窄带滤波片透过率测量不确定度, U_P 为光路中其他光学器件透过率测量不确定度, U_S 为单光子探测器计数的测量不确定度, U_C 为符合计数的测量不确定度, U_D 为背景计数的测量不确定度, U_A 为测量重复性不确定度。

实验测得 Si 量子效率测量的各个不确定分量值见表 1。将表 1 中的各个不确定分量值代入式(10)中,可以获得相关光子法测量的 Si 单光子探测器量子效率相对合成标准不确定度为 0.94% ($k=2$); 同理, 实验中测得 InGaAs 量子效率测量的各个不确定分量值见表 2。将表 2 中的各个不确定分量值代入式(10)中,可以获得相关光子法测量的 InGaAs 单光子探测器量子效率相对合成标准不确定度为 0.98%。

表 1 Si-APD 单光子探测器量子效率测量不确定度分析

Table 1 Measurement uncertainty for Si single photo detector quantum efficiency

Measurement uncertainty	Measured value/ $\times 10^{-4}$
Transmittance of narrowband filter	18.7
Transmittance of other optical devices	20.2
Trigger count	18.6
Coincidence count	20.4
Background count	16.5
Measuring repeatability	20.0
Combined uncertainty	46.8

表 2 InGaAs-APD 单光子探测器量子效率测量不确定度分析

Table 2 Measurement uncertainty for InGaAs single photon detector quantum efficiency

Measurement uncertainty	Measured value/ $\times 10^{-4}$
Transmittance of narrowband filter	19.2
Transmittance of other optical devices	20.7
Trigger count	17.5
Coincidence count	25.9
Background count	10.8
Measuring repeatability	21.8
Combined uncertainty	48.7

5 结论

本文研究了通过自发参量下转换过程产生的相关光子, 利用相关光子法测量了 Si 雪崩光电二极管单光子探测器在 778 nm 波长点以及 InGaAs 雪崩光电二极管单光子探测器在 1550 nm 波长点的量子效率, 并将测量结果与参考典型值进行了比较, 两者的一致性达 0.8%。对测量中不确定度的来源进行了分析, 两个单光子探测器量子效率测量不确定度均优于 1%。下一步的工作将开展激光衰减方法的对比实验, 进一步验证该系统的准确性。

参考文献

- [1] GISIN N, RIBORDY G, TITTEL W, *et al.* Quantum cryptography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, **74**(1): 145-195.
- [2] CAO Ya-mei, NIE Min, LIU Xiao-hui. Differential phase encoding scheme for the polarization state of quantum signaling and simulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 721-726.
曹亚梅, 聂敏, 刘晓慧. 量子信令的偏振态差分相位编码方案及仿真[J]. *光子学报*, 2013, **42**(6): 721-726.
- [3] REN Min, GU Xiao-rong, LIANG Yan, *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.
- [4] YIN Wen-ye, SHI Feng, HE Wei-ji, *et al.* Distance estimation method based on photon counting LIDAR[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0501002.
尹文也, 石峰, 何伟基, 等. 时间相关单光子计数型激光雷达距离判别法[J]. *光子学报*, 2015, **44**(5): 0501002.
- [5] NIGHTINGALE N S. A new silicon avalanche photodiode photon counting detector module for astronomy [J]. *Experimental Astronomy*, 1990, **1**(6): 407-422.
- [6] HE Jun-fang, WANG Shui-cai, REN Zhao-yu. Delay papping frame scanning single photon counting fluorescence spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 807-810.
贺俊芳, 王水才, 任兆玉. 延时分幅扫描单光子计数荧光光谱技术[J]. *光子学报*, 2002, **31**(7): 807-810.
- [7] POLYAKOV S V, MIGDALL A L. High accuracy verification of a correlated photon-based method for determining

- photon-counting detection efficiency[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1390-1407.
- [8] CHEUNG J Y, VAUGHAN M P, MOUNTFORD J R, *et al.* Correlated photon metrology of detectors and sources[C]. SPIE, 2004, **5161**: 365-376.
- [9] G-BELLOUSTI A, RAZET A, BASTIE J, *et al.* Radiometric reference for weak radiations: comparison of methods[J]. *Metrologia*, 2005, **42**(4): 271-277.
- [10] BRIDA G, CASTELLETTO S, DEGIOVANNI I P, *et al.* Quantum efficiency and dead time of single-photon counting photodiodes: a comparison between two measurement techniques[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 625-628.
- [11] CHEN Xi-hao, ZHAI Yan-hua, ZHANG Da, *et al.* Absolute self-calibration of the quantum efficiency of single-photon detectors[J]. *Optics Letters*, 2006, **16**(31): 2441-2443.
- [12] LI Jian-jun, ZHENG Xiao-bing, LU Yun-jun, *et al.* Quantum efficiency calibration of opto-electronic detector by means of correlated photons method[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, **6**(7): 472-475.
- [13] HU You-bo, LI Jian-jun, XIA Mao-peng, *et al.* Measurement and correction of linearity of photon counters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0604001.
胡友勃, 李健军, 夏茂鹏, 等. 光子计数器的线性测量和修正[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0604001.
- [14] ZHAO Kun, LIU Chang-ming, CHEN Hai-dong, *et al.* InGaAs single photon detector quantum efficiency measurement at 1550nm[C]. SPIE, 2014, **9449**: 94492Y.
- [15] SHI Xue-shun, YANG Le-chen, CHEN Kun-feng, *et al.* Experiment research of second harmonic generation characteristics in periodically poled KTiOPO₄ crystal[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2014, **34**(1): 57-60.
史学舜, 杨乐臣, 陈坤峰, 等. 周期极化磷酸氧钛钾晶体倍频特性实验研究[J]. 宇航计测技术, 2014, **34**(1): 57-60.
- [16] CHEN Hai-dong, SHI Xue-shun, ZHAO Kun, *et al.* Design of single-photon detector quantum efficiency measurement and control software based on LabVIEW[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2015, **35**(3): 55-60.
陈海东, 史学舜, 赵坤, 等. 基于 LabVIEW 的单光子探测器量子效率测控软件设计[J]. 宇航计测技术, 2015, **35**(3): 55-60.

Foundation item: The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2015AA123702), the National Basic Research Program of China (No. J312012B001) and Key Laboratory Foundation of Science and Technology on Electronic Test and Measurement (No. 9140C120302150C12058)