

引用格式: LIU Chang-ming, SHI Xue-shun, ZHANG Peng-ju, *et al.* Detection Efficiency Measurement of Silicon Single-photon Avalanche Detector Traceable Using Standard Detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1248006

刘长明, 史学舜, 张鹏举, 等. 基于标准探测器的硅单光子雪崩探测器探测效率测量[J]. 光子学报, 2019, **48**(12): 1248006

基于标准探测器的硅单光子雪崩 探测器探测效率测量

刘长明^{1,2}, 史学舜^{1,2}, 张鹏举^{1,2}, 庄新港^{1,2}, 刘红博^{1,2}

(1 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

(2 国防科技工业光电子一级计量站, 山东 青岛 266555)

摘 要: 针对硅单光子雪崩探测器探测效率高准确度测量的需要, 建立了一套溯源至标准探测器的硅单光子探测器探测效率测量装置. 首先通过大动态范围高精度衰减产生光子数已知的准单光子源来校准探测器的探测效率, 其次对影响探测效率测量的后脉冲概率和死时间进行了分析与测量, 最后系统分析了各测量不确定度的来源, 实现了硅单光子雪崩探测器在 632.8nm 波长处探测效率测量不确定度达到 0.6% ($k=2$). 该装置采用超连续谱光源与单色仪组合输出单色光源, 结合标准探测器, 可根据需要实现硅单光子雪崩探测器宽波段内的探测效率自动化测量.

关键词: 硅单光子雪崩探测器; 探测效率; 后脉冲; 死时间; 标准探测器

中图分类号: TN23

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1248006

Detection Efficiency Measurement of Silicon Single-photon Avalanche Detector Traceable Using Standard Detector

LIU Chang-ming^{1,2}, SHI Xue-shun^{1,2}, ZHANG Peng-ju^{1,2}, ZHUANG Xin-gang^{1,2}, LIU Hong-bo^{1,2}

(1 *The 41st Research Institute of China Electronic Science and Technology Group, Qingdao, Shandong 266555, China*)

(2 *National Opto-Electronic Primary Metrology Laboratory, Qingdao, Shandong 266555, China*)

Abstract: An experimental facility designed for the detection efficiency measurement of silicon single-photon avalanche detector traceable using standard detector is described. The photon rate is determined from the standard detector and a large dynamic range attenuation technique. Furthermore, the afterpulsing probability and dead time are considered and measured. The component uncertainties associated with the measurement of detection efficiency are analyzed. The obtained expanded measurement uncertainty is 0.6% ($k=2$). Combining the monochromatic source consisted of supercontinuum laser and monochromator, the detection efficiency of silicon single-photon avalanche photodiodes could be automatic measured in a broad wavelength range using the standard detector in the setup.

Key words: Silicon single-photon avalanche detector; Detection efficiency; Afterpulsing; Dead time; Standard detector

OCIS Codes: 040.1345; 040.6040; 120.4800; 250.1345

0 引言

硅单光子雪崩探测器(Silicon Single-photon Avalanche Detector, Si-SPAD)是众多类型的单光子探测

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2018YFB0504602), 国防技术基础项目(Nos. JSJL2016210C002, JSJL2018210C003)

第一作者: 刘长明(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光电探测器计量. Email: tdjylcm@163.com

通讯作者: 史学舜(1975-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为光辐射及光电探测器计量. Email: xshshi@163.com

收稿日期: 2019-08-16; 录用日期: 2019-10-23

器中发展较快、也是技术非常成熟的一种,广泛应用于量子密码学、单光子测距、生物发光检测、精密分析、天文测光等领域.探测效率作为 Si-SPAD 的关键参数,对其测量技术的研究已持续了数十年^[1-11].目前,主要通过相关光子法^[2,5,10-11]和标准探测器法^[3,8-9]对探测效率进行测量.相关光子法通过非线性参量下转换效应产生成对的相关光子,探测到其中一个光子预示着必然存在一个相关光子,最后对两路单光子探测器计数信号进行符合计数从而计算得出探测效率.该方法作为一种“无溯源”测量方法,无需溯源至客观测量标准,是一种独立的基准式测量方法.虽然相关光子可以在一个光谱范围内同时产生,但探测效率的测量需要在每一个波长点进行窄带滤波和相关光子通道透过率测量,所以使得探测效率随波长变化的测量具有很大局限性.从计量角度讲,也需要利用现有的溯源至光辐射测量基准-低温绝对辐射计的标准对其进行验证.标准探测器法是将现有的光辐射量传体系延伸到单光子领域,因现有光辐射体系已建立了较完备的量传链路,所以标准探测器配合可调光源就可以实现宽光谱范围内探测效率的灵活测量.由于探测效率的测量受到光源光子分布的影响,利用对激光光源进行大动态范围衰减得到的满足泊松分布的准单光子源来测量探测效率的准确度同样也需要进行验证,所以结合以上两种方法的特点,能够同时满足宽光谱测量、测量精度高、灵活测量的一种方案是:通过在分立波长点利用两种方法进行比对验证,若满足测量比对要求,即认为两种方法均有效,然后通过标准探测器法实现宽光谱范围的探测效率测量,因该方法具有更好的灵活型.通过分析影响探测效率测量的各个环节^[3,8-9]可以看出,需要从减小标准探测器的光谱响应度测量不确定度,定量分析后脉冲和死时间效应对探测效率测量的影响,减小光功率波动带来的测量误差,提高测量重复性等多个方面进行提高,才能使探测效率的测量达到一个较高的准确度.由于测量范围存在差异,标准探测器无法实现对入射 Si-SPAD 光子数的直接测量,本文利用直接溯源至光功率测量基准的标准探测器分别测量光源出射功率和滤光片的透过率,实现对入射 Si-SPAD 光子数的间接测量,并使用高精度的位移装置保证滤光片的重复性.其次对影响探测效率的两个重要参数后脉冲概率和死时间进行分析与测量,并引入监视探测器来修正光功率波动,最终实现探测效率测量不确定度达到 0.6% ($k=2$).

1 测量模型

国外众多计量机构,如美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST),德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)和韩国国家计量院等均利用溯源至低温绝对辐射计的标准探测器来校准 Si-SPAD 的探测效率,给出了所用测量模型,进行了一些比对测量研究,并给出了测量不确定度分析,见表 1;国内目前还未见相关报道.

表 1 基于标准探测器的 Si-SPAD 探测效率测量

Table 1 Detection efficiency measurement of Si-APD using standard detector

Year	Uncertainty($k=1$)	Wavelength/nm	Measurement of additional parameters	Reference
2000	$\sim 1\%$	632.8	Dead time	[1]
2005	6.8%	632.8	Dead time	[3]
2007	0.17%	702	Dead time and afterpulsing	[5]
2015	0.31%	770	Dead time	[8]
2016	0.16%	770	/	[9]
This work	0.3%	632.8	Dead time and afterpulsing	/

由于 Si-SPAD 复杂的探测机制,其输出计数值由有效光子计数、后脉冲计数以及噪声计数三部分组成.有效光子计数是探测器吸收入射光子后输出的计数值,噪声计数包含探测器本身的暗计数、环境噪声计数以及其引发的后脉冲计数.由于存在后脉冲效应^[12-13],一个入射光子产生的雪崩脉冲可能引起一个或多个初级后脉冲,同样一个初级后脉冲可能产生一个或多个次级后脉冲,所以从宏观统计的计数值中,部分计数为后脉冲计数,这在 Si-SPAD 探测效率的高准确度测量中需要定量分析出其所占比例.后脉冲主要分为两类,一类是由俘获载流子再释放引起的后脉冲,其概率不随入射光子数的变化而发生改变;另一类是光子在死时间作用后期到达引起的延迟性计数^[5,14],通常被认为是探测效率的一部分,本文所指的后脉冲概率为第一类,其值被认为是一个固有常数.此外, Si-SPAD 在进行一次计数后自身会设置一定的时间对雪崩效应进行抑制,该时间段内对入射光子无响应,称之为死时间.通过对 Si-SPAD 复杂的工作机制进行分析可以看出^[5-6],

由于后脉冲和死时间效应的存在,简单的用计数值与入射光子数的比值来得出探测效率是不够全面的,尤其是当用该值来反演入射光通量时,可能会有较大的误差,这就需要对后脉冲概率和死时间参数进行测量并对探测效率进行修正.经后脉冲概率修正后的光子计数值表达式为

$$N = \frac{N_{\text{total}} - N_{\text{noise}}}{1 + P_{\text{af}}} \quad (1)$$

式中, N 为光子引发计数, N_{total} 为探测器总计数, N_{noise} 为噪声计数(包含探测器自身暗计数、环境噪声计数与其引发的后脉冲计数), P_{af} 为后脉冲概率.Si-SPAD探测效率是光子计数值与入射光子数的比值,所以探测效率 η 的表达式为

$$\eta = \frac{N}{N_{\text{in}}} \quad (2)$$

式中, N_{in} 为入射光子数.由于死时间 τ_{dead} 的存在,入射光子流速率低速时,一般认为不超过5 MHz^[15],经死时间参数修正后的探测效率表达式为^[15-16]

$$\eta = \frac{N_{\text{total}} - N_{\text{noise}}}{N_{\text{in}} \cdot (1 + P_{\text{af}})} \cdot \frac{1}{1 - N_{\text{total}} \cdot \tau_{\text{dead}}} \quad (3)$$

Si-SPAD探测效率的高准确度校准,其目的是能够准确的测量入射光通量,通过式(3),只需要知道 N_{total} 、 N_{noise} 、 P_{af} 、 τ_{dead} 这四个参数就可以准确得出入射光子数.

2 测量装置与过程

2.1 测量装置

测量装置主要由单色光源、多组滤光片及位移台、标准探测器等组成,待测单光子探测器为空间耦合型Si-SPAD(SPCM-AQRH-16,Excelitas),工作于自由探测模式,测量装置示意图见图1.单色光源主要由超连续谱光源(Supercontinuum laser)和单色仪(Monochromator)组成.超连续谱光源(EXR-20PP,丹麦NKT),光谱范围450 nm~2 400 nm,重复频率覆盖2 MHz~78 MHz,功率输出稳定度 $<0.3\%$ @30 min.单色仪输出光依次经过显微物镜1(Microscope objective 1)、光纤(Fiber)和准直器(Collimator)后被准直为近平行光.分光片(Beam splitter)分出部分光入射监视探测器(Monitor detector),监视探测器(S1228,Hamamatsu)全程记录光功率值,用来实时修正光功率的波动.光快门(Shutter)用于切断光路进行探测器的噪声测量.滤光片组由三个滤光片组成(Filter1、Filter2、Filter3),其中Filter1为固定式滤光片,Filter2和Filter3为阶跃式可变中性密度滤光片(NDL-25S-4,Thorlabs),可通过组合满足不同透过率的要求.标准探测器采用三片反射式硅陷阱探测器(Si-trap),Si-trap具有线性响应好(动态范围nW~mW)、反射系数低($\sim 0.02\%$ @632.8 nm)、性能稳定等优点,作为低温辐射计的次级传递标准被广泛使用^[15-16],通过在多个分立波长点溯源至低温辐射计结合插值算法,可在400 nm~980 nm光谱范围内实现绝对光谱响应度优于0.2% ($k=2$)的测量不确定度^[17-19].显微物镜2(Microscope objective 2, M-10X, NA=0.25, Newport)用于将入射光聚焦至Si-SPAD光敏面,本文所用Si-SPAD光敏面直径约为180 μm ,根据文献[20],探测效率最优探测面在100 μm 以内,当入射光斑尺寸超过100 μm 时,探测效率会有较明显的下降,所以本装置将入射至Si-SPAD的光斑全尺寸限制在100 μm 以内,使用CCD(WinCamD-UCD23,DataRayInc.)对光束进行测量,得到焦点

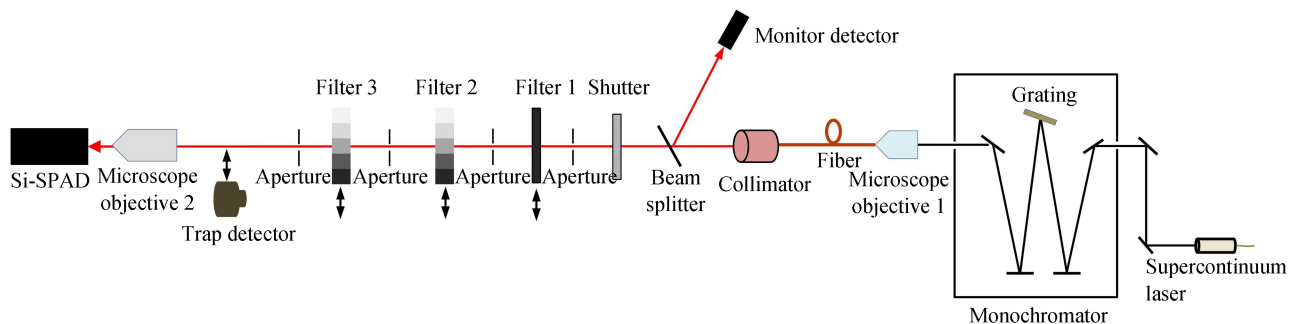


图1 Si-SPAD探测效率测量装置示意图

Fig.1 Schematic setup for the detection efficiency measurement of Si-SPAD

处光斑全尺寸约为 $85 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$. 本装置还使用了多个光阑 (Aperture) 对反射光束进行阻挡, 用来减少光束在多个滤光片之间的多次反射和降低 Si-SPAD 的噪声计数.

2.2 入射光子数 N_{in} 测量

由式(1)可以看出, 已知入射光子数是探测效率能够准确测量的关键. 本装置首先用 Si-trap 探测器依次单独测量每个滤光片的透过率, 测量顺序为先将滤光片 Filter 3 切入光路, 通过切入前后的功率比值得出 Filter 3 的透过率, 测量完成后将 Filter 3 移除光路, 重复上述操作, 依次得出 Filter 2 和 Filter 1 的透过率, 透过率计算公式见式(4)、(5). 为保证测量过程中的重复性, 滤光片和 Si-SPAD 的切入/移除光路均通过精密位移台 (DDS220, Thorlabs) 实现, 重复定位精度 $\pm 0.25 \mu\text{m}$.

$$\begin{cases} P_0 = \frac{V_0}{A_0 \cdot R} \\ P_1 = \frac{V_1}{A_1 \cdot R} \\ P_2 = \frac{V_2}{A_2 \cdot R} \\ P_3 = \frac{V_3}{A_3 \cdot R} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_0, P_1, P_2, P_3 依次是光源输出光功率以及三组滤光片单独测量时的透过光功率值, R 为 Si-trap 的光谱响应率, A_0, A_1, A_2, A_3 是测量时 I/V 放大器不同档位的增益系数, V_0, V_1, V_2, V_4 为输出电压值, 则三组滤光片的透过率为

$$\begin{cases} T_{F1} = \frac{P_1}{P_0} \cdot C_1 \\ T_{F2} = \frac{P_2}{P_0} \cdot C_2 \\ T_{F3} = \frac{P_3}{P_0} \cdot C_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中, T_{F1}, T_{F2}, T_{F3} 分别是三组衰减片的透过率, 取 6 次测量的平均值. 由于各光功率值的测量存在时间差, 三组透过率计算时需要引入光功率修正因子 C_1, C_2, C_3 . T_M 为 Si-SPAD 前显微物镜的透过率, 在放置 Si-SPAD 之前对其透过率进行了单独测量, 透过率 $T_M = 0.9962 \pm 0.0005$. 所以, 光源至 Si-SPAD 的整体透过率 T 为

$$T = T_{F1} \cdot T_{F2} \cdot T_{F3} \cdot T_M \quad (6)$$

则入射 Si-SPAD 的单位时间内的光子数为

$$N_{\text{in}} = \frac{P_0 \cdot T}{E} \quad (7)$$

$E = hc/\lambda$ 为单个光子的能量, 将式(4)、(5)、(6)带入式(7)得

$$N_{\text{in}} = \frac{V_1 \cdot V_2 \cdot V_3}{V_0^2} \cdot \frac{A_0^2}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot T_M \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot \frac{1}{R} \quad (8)$$

所以, 探测效率 η 的计算公式为

$$\eta = \frac{N_{\text{total}} - N_{\text{noise}}}{1 + P_{\text{af}}} \cdot \frac{1}{1 - N_{\text{total}} \cdot \tau_{\text{dead}}} \cdot \frac{V_0^2}{V_1 \cdot V_2 \cdot V_3} \cdot \frac{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3}{A_0^2} \cdot \frac{1}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3} \cdot \frac{1}{T_M} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{hc}{R} \quad (9)$$

2.3 后脉冲概率 P_{af} 与死时间 τ_{dead} 测量

Si-SPAD 输出计数值由光子计数 N_{photon} 、后脉冲计数 $N_{\text{afterpulse}}$ 以及噪声计数 N_{noise} 三部分组成, 即

$$N_{\text{total}} = N_{\text{photon}} + N_{\text{noise}} + N_{\text{afterpulse}} \quad (10)$$

后脉冲概率是后脉冲计数与光子计数的比值, 则后脉冲概率计算公式为

$$P_{\text{af}} = \frac{N_{\text{afterpulse}}}{N_{\text{photon}}} = \frac{N_{\text{total}} - N_{\text{photon}} - N_{\text{noise}}}{N_{\text{photon}}} \quad (11)$$

式(11)是对后脉冲整体概率进行测量, 不区分初级或次级后脉冲概率. 通过关断和打开入射光子将 Si-

SPAD 的输出信号接入计数器可直接得到噪声计数值 N_{noise} 和总计数值 N_{total} , 光子计数 N_{photon} 利用时间相关单光子计数技术 (Time-correlated Single Photon Counting Technique, TCSPC) 测量得出^[10]. 脉冲激光同步信号和 Si-SPAD 计数信号均为 TTL 电平, 接入时幅转换系统 (Time Amplitude Converter, TAC) 前首先通过“TTL—NIM”转换器 (SIA400, Picoquant) 进行电平转换, 本装置所用 TAC 为德国 Picoquant 公司的 HydraHarp 400 型双通道时间相关单光子计数仪器. 脉冲激光同步信号和 Si-SPAD 计数信号分别接入 TAC 的 Start 端和 Stop 端, 通过符合测量得到光子计数 N_{photon} , TAC 工作于计数模式下可直接记录 Si-SPAD 的噪声计数值 N_{noise} 和总计数值 N_{total} , 无须激光同步触发信号, 后脉冲概率测量装置如图 2 所示. 将测得的总计数值 N_{total} 、光子计数值 N_{photon} 、噪声计数值 N_{noise} 代入式 (11) 即可得到后脉冲概率 P_{af} . 本文所用 Si-SPAD 的后脉冲概率测量值 $P_{\text{af}} = 0.005 \pm 0.0005$, 测量误差约为 10%, 对探测效率的测量不确定度贡献量为 0.05%.

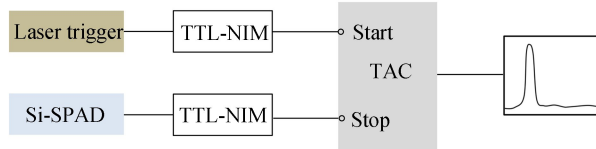


图 2 Si-SPAD 后脉冲概率测量装置原理图

Fig.2 Schematic diagram for the afterpulse probability of Si-SPAD

死时间的测量通过 TAC 的时间标签模式直接记录每个计数事件的发生时间, 通过对相邻计数事件发生的时间间隔进行统计, 得出 Si-SPAD 的死时间, 测量时无需激光同步触发信号. 根据厂家给出的 Si-SPAD 死时间典型值 25 ns, 测量时设置脉冲光源重复频率为 50 MHz (脉冲间隔小于 SPAD 死时间), 通过调整滤光片透过率增加入射光子数, 使 Si-SPAD 计数值接近饱和. TAC 记录每个计数时间发生的时间, 将相邻计数事件的时间差进行统计后, 得到 Si-SPAD 的死时间测量统计分布如图 3 所示, 测量时 TAC 分辨率设置为 64 ps, 最终得到 Si-SPAD 的死时间为 $\tau_{\text{dead}} = 23.5 \text{ ns} \pm 0.26 \text{ ns}$.

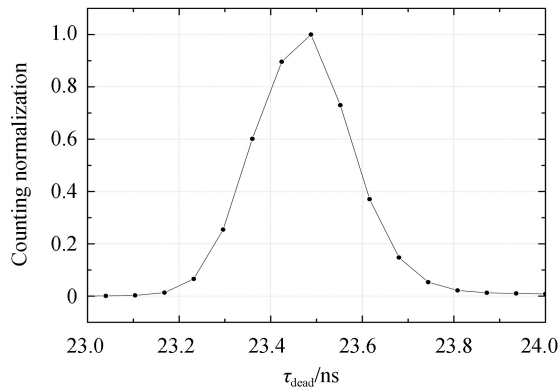


图 3 Si-SPAD 死时间分布

Fig.3 Dead time distribution of Si-SPAD

3 测量结果与测量不确定度分析

光源输出波长为 632.8 nm, 光谱半高宽为 0.6 nm, 三组滤光片的透过率分别为 1.99×10^{-3} 、 7.66×10^{-4} 和 8.38×10^{-4} , Si-SPAD 的计数值约为 650 kHz, 探测效率测量结果为 $\eta = 0.694 \pm 0.004$, 测量不确定度 $U_{\text{rel}} = 0.6\%$ ($k=2$), 测量不确定度分析见表 2. 由表 2 可以看出, 不确定度 A 类评定即测量重复性引入的不确定度为 0.1%; 不确定度 B 类评定主要分项有 Si-SPAD 的计数值波动和放大器增益系数校准. Si-SPAD 计数值波动较大的原因经分析是由光斑波动和 SAPD 光敏面不均匀性造成. 这是由于实验中所用光斑尺寸约为 $85 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$, 由于光斑很小, 其波动约在 $10 \mu\text{m}$ 以内. 经查阅文献[9], 该类型探测器在中心区域 $40 \mu\text{m}$ 范围内的均匀性约 $\sim 0.3\%$, $20 \mu\text{m}$ 范围内的均匀性约为 $\sim 0.1\%$, 这与本文测得的结果基本符合. 标准探测器 Si-trap 在 400 nm~980 nm 波段内, 绝对光谱响应度测量不确定度为 $0.05\% \sim 0.2\%$ ($k=2$)^[17], 预计在整个波段内 Si-SPAD 的探测效率测量不确定度可优于 1% ($k=2$).

表 2 测量不确定度来源及分析

Table 2 Measurement uncertainty budget

Source of uncertainty	Relative uncertainty of value/%	Sensitivity coefficient	Contribution/%
Type A			
Type B	0.10	1	0.10
Total counting	0.15	1.007	0.151
Noise counting	4	0.008	0.032
Afterpulsing probability	10	0.005	0.05
Dead time	3	0.017	0.051
Voltage measurement	0.08	1	0.08
Amplifiers gain calibration	0.16	1	0.16
Power correction	0.09	1	0.09
Objective transmittance	0.05	1	0.05
Wavelength	0.06	1	0.06
Spectral responsivity@632.8 nm	0.05	1	0.05
Combined standard uncertainty			0.30
Expanded uncertainty ($k=2$)			0.6

4 结论

Si-SPAD 的工作机制决定了其探测效率不仅仅是计数值与入射光子数的比值,还需要对后脉冲概率和死时间进行测量来对探测效率进行修正.本文建立了一套 Si-SPAD 探测效率测量装置,首先通过标准探测器实现对入射 Si-SPAD 光子数的间接测量,其次对后脉冲概率和死时间进行了分析和测量,并对不确定度来源进行了系统分析,最终实现探测效率测量不确定度达到 0.6% ($k=2$).此外,本装置可根据测试需要实现 Si-SPAD 在宽波段内探测效率的自动测量,预计测量不确定度可优于 1% ($k=2$).下一步工作中将联合其他实验室进行 Si-SPAD 探测效率测量比对,来验证不同测量装置或测量机理下测量结果是否具有较好的一致性.

参考文献

- [1] 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.
- [2] WARE M, MIGDALL A. Single-photon detector characterization using correlated photons: the march from feasibility to metrology[J]. *Journal of Modern Optics*, 2004, **51**(9): 1549-1557.
- [3] GHAZI-BELLOUATI A, RAZET A, HIMBERT M E, *et al.* Radiometric reference for weak radiations: comparison of methods[J]. *Metrologia*, 2005, **42**(4): 271-277.
- [4] WARE M, MIGDALL A, BIENFANG J C, *et al.* Calibrating photon-counting detectors to high accuracy: background and deadtime issues[J]. *Journal of Modern Optics*, 2007, **54**(2): 361-372.
- [5] 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.
- [6] POLYAKOV S V, MIGDALL A. High accuracy calibration of photon-counting detectors "on demand" [C]. SPIE, 2007, **6583**: 65830A.
- [7] CHEUNG J Y, CHUNNILALL C J, PORROVECCHIO G, *et al.* Low optical power reference detector implemented in the validation of [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(21): 20347-20363.
- [8] LOPEZ M, HOFER H, KUCK S. Detection efficiency calibration of single-photon silicon avalanche photodiodes traceable using double attenuator technique[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, **62**(20): 1732-1738.
- [9] DHOSKA K, HOFER H, RODIEK B, *et al.* Improvement of the detection efficiency calibration and homogeneity measurement of Si-SPAD detectors[J]. *Springerplus*, 2016, **5**(1): 2065.
- [10] SHI Xue-shun, LIU Chang-ming, ZHAO Kun, *et al.* Measurement system for quantum of the single photon detector based on correlated photons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0304001.
史学舜, 刘长明, 赵坤, 等. 基于相关光子的单光子探测器量子效率测量系统[J]. 光子学报, 2017, **46**(3): 0304001.
- [11] GAO Dong-yang, LIU Chang-ming, HU You-bo, *et al.* Intercomparison of correlated photon method based on continuous wave and pulsed laser pumping[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(6): 0612002.
高冬阳, 刘长明, 胡友勃, 等. 基于连续和脉冲激光泵浦的相关光子实验比对[J]. 光子学报, 2019, **48**(6): 0612002.
- [12] COVA S, LACAITA A, RIPAMONTI G. Trapping phenomena in avalanche photodiodes on nanosecond scale[J].

- IEEE Electron Device Letters*, 1991, **12**(20): 685-687.
- [13] CAMPBELL L. After measurement and correction[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, **63**(12): 5794-5798.
- [14] HU You-bo, LI Jian-jun, GAO Dong-yang, *et al.* Accuracy analysis for coincidence measurement of entangled photons calibration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(4):0428002.
胡友勃,李健军,高冬阳,等.相关光子定标的符合测量精度分析[J].光子学报,2019, **48**(4):0428002.
- [15] IN-HO B, SEONGCHONG P, KEE-SUK H, *et al.* Detection efficiency measurement of single photon avalanche photodiodes by using a focused monochromatic beam tunable from 250 nm to 1000 nm[J]. *Metrologia*, 2019, **56**(3): 035003.
- [16] TOMMSAO L, BORIS K, BRUNO S, *et al.* Absolute calibration of fiber-coupled single-photon detector[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(15): 18078-18092.
- [17] LIU Chang-ming, SHI Xue-shun, LIU Yu-long, *et al.* Determination of absolute spectral response and quantum efficiency of Si trap detector in band of 325~980nm[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, **26**(4): 667-670.
刘长明,史学舜,刘玉龙,等.硅陷阱探测器在325~980 nm波段的绝对光谱响应率和量子效率测定[J].光电子·激光,2015, **26**(4):667-670.
- [18] ALEJADRO F, JOAQUIN C, ALICIA P, *et al.* New model for the internal quantum efficiency of photodiodes based on photocurrent analysis[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(2): 208-216.
- [19] GENTILE T R, BROWN S W, LYKKE K R, *et al.* Internal quantum efficiency modeling of silicon photodiodes[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(10): 1859-1864.
- [20] Excelitas Technologies. Excelitas SPCM-AQRH family datasheet[N/OL]. (2018-12) [2019-08-15]. <https://www.excelitas.com/product/spcm-aqrh>.