

doi:10.3788/gzxb20164506.0604001

光子计数器的线性测量和修正

胡友勃^{1,2}, 李健军², 夏茂鹏², 高冬阳², 郑小兵²

(1 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 合肥 230026)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

摘要:依据自发参量下转换过程中泵浦光功率和相关光子的线性关系,搭建了光子计数器线性测量实验装置,分析了光子计数器非线性误差产生的机理,探讨其线性应用条件和修正方法.通过调节泵浦光功率改变入射至光子计数器的相关光子速率,实现了光子计数器线性的测量,并对实验测量值进行了修正.结果表明,通过线性测量和修正可以提高单光子计数器测量准确度,降低光子计数器的非线性误差,其入射光子速率最大线性工作范围可由 10^5 s^{-1} 扩大到 10^7 s^{-1} .

关键词:光电子;光子计数;线性;探测器;自发参量下转换;测量和修正

中图分类号:O437

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)06-0604001-6

Measurement and Correction of Linearity of Photon Counters

HU You-bo,^{1,2} LI Jian-jun², XIA Mao-peng², GAO Dong-yang², ZHENG Xiao-bing²

(1 School of Environment Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Linear measurement device was set up based on the linear relationship between pump power and photons in spontaneous parametric down conversion process. The nonlinearity errors mechanism, linear condition and correction model of photon counting detector were analyzed. For the sake of realizing the linear measurement of the photon counting, the pump power was adjusted to change incident photon rate, and the experimental measurements were corrected. The results show that the measurement precision can be improved by measurement and correction. The maximum linear range rate of the incident photon could be expanded from $10^5 / \text{s}$ to $10^7 / \text{s}$ result from lower non-linear errors.

Key words: Optoelectronics; Photon counting; Linear; Detectors; Spontaneous parametric down conversion; Measurement and correction

OCIS Codes:040.0040;230.5160;120.0120;000.2190;300.6420

0 引言

单光子探测技术在量子保密通讯^[1-3]、大气污染监测^[4]、高分辨率光谱测量^[5-7]等领域有着广泛的应用.该技术通过分辨单个光子在光电探测器中激发出来的光电子脉冲,采用脉冲放大,脉冲甄别和数字计数技术来实现光子计数,提高极弱光探测的灵敏度.

为了保证光子计数器在大动态范围内的计数准确度,需要经常校准光子计数器的线性^[8],即检测其计数值是否与测量光强成正比关系.校准线性的常用方法

有强光衰减法和光照度平方反比定律法.

强光衰减法使用精密光纤衰减器对强光进行定量衰减,实现光子计数器的线性测量.由于光在滤光片间存在重复反射与干涉效应,以及滤光片透光率的不均匀,使得误差接近 5%^[9].

光照度平方反比定律法通过改变光源与探测器光敏面间的距离来改变探测器接收的光强,实现光子计数器的线性测量.光源与探测器间距较大时,杂散光的影响非常明显,误差达 3%^[10].

本文从提高光子计数器测量准确度角度出发,通

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11204318, 61275173)和国家高技术研究发展计划(No. 2015AA123702)资助

第一作者:胡友勃(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为高精度光学传感器辐射定标技术. Email: hgdyb2010@163.com

导师(通讯作者):郑小兵(1969-),男,研究员,博导,主要研究方向为高精度光学传感器辐射定标技术. Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

收稿日期:2015-12-04;录用日期:2016-01-29

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

通过分析常用单光子计数器原理,提出了一种线性测量方法,搭建了单光子计数器线性实验测量装置,根据自发参量下转换(Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC)过程中泵浦光功率与参量下转换产生的相关光子线性关系,实现了探测器的线性测量,系统误差小于3%.与传统线性测量方法相比,通过调节泵浦光功率来控制入射至探测器的光强,可以有效提高光子计数器线性定标的准确度,由于自发参量下转换的宽光谱特性,该方法有望适用于测量不同类型单光子计数器在不同波长的线性。

1 理论基础

目前常用的光子计数器有光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)和雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)。

1.1 APD 非线性误差

当有光子信号到达 APD 时, APD 产生电脉冲信号。为了能够对下一个光子信号产生响应,当雪崩发生后 APD 会被迅速地切断两端电压,使 APD 恢复到接收光子的状态,通常将这段恢复时间称为死时间^[11]。

在死时间内,探测器对入射光子的不响应,是造成光子计数非线性误差的主要原因,每一个计数都会产生一段死时间,入射光子速率越大,死时间内漏计的光子数越多,造成电脉冲数与入射光子数的比例关系不断变化,即 APD 的非线性误差也越大。

假设光子在单位时间内到达 APD 的概率相等,即死时间内入射光子速率和非死时间内入射光子速率相等,那么光子计数速率 R_{measured} 可表示为

$$R_{\text{measured}} = \frac{\eta R}{1 + \eta R \cdot T_d} \quad (1)$$

式中 T_d 为 APD 死时间, η 是 APD 的量子效率, R 是入射光子速率。那么非线性误差 E 可表示为

$$E = \frac{R - R_{\text{measured}}}{R} = 1 - \frac{1}{1 + \eta R \cdot T_d} \quad (2)$$

当 $\eta = 0.6$, $T_d = 26 \text{ ns}$ 时,根据式(1)可通过模拟得到 APD 的理论响应曲线,如图 1。

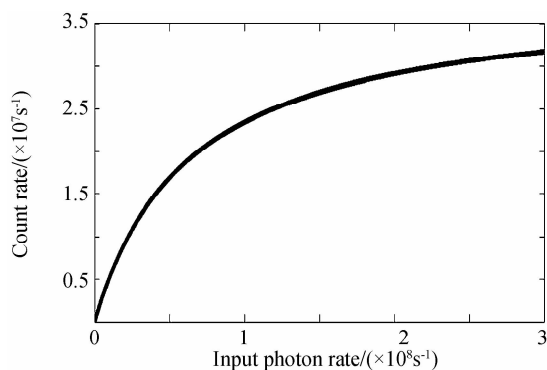


图 1 APD 的理论响应曲线

Fig. 1 The theoretical response curve of APD

由图 1 可知, APD 在入射光子速率较低时,测量保持线性;当入射光子速率较大时,光子计数速率远小于入射光子速率,非线性误差变大。因此当光子计数速率较低时,非线性误差接近于零,入射光子数等于光子计数;光子计数较大时,测量和校正光子计数器的线性具有重要的意义。

1.2 PMT 非线性误差

当光子信号到达 PMT 产生响应时,若在 PMT 分辨时间内有两个或两个以上的光子入射到 PMT 的光阴极,会在输出阳极形成的脉冲出现脉冲幅度和脉宽宽度的叠加,即出现了脉冲重叠的情况,又称之为脉冲堆积效应^[12]。

脉冲堆积一般发生在光功率比较大的时候,因为在有限的时间内,光子数目较多, PMT 难以分辨,容易发生脉冲堆积。脉冲堆积效应分三个阶段:开始阶段,入射光子速率很小,没有脉冲堆积;入射光子速率逐渐增大,开始出现光子堆积效应,开始出现偏差;入射光子速率继续增大,光强已经很强,曲线有下降的趋势,计数偏差越来越大。

一般情况下,假设 PMT 光子服从泊松分布的条件,即 t 时间内有 n 个光电子电荷脉冲的概率为

$$P(n, t) = \frac{(Nt)^n \cdot e^{-Nt}}{n!} \quad (3)$$

式中, N 为入射光子速率,由于脉冲数等于间隔数,因此实际探测到的脉冲数等于测量的间隔数。设 PMT 的脉冲分辨时间为 τ_a , 甄别器的死时间为 τ_b , 计数器的死时间为 τ_c 。实际上,由于 τ_a , τ_b , τ_c 等的限制,进入理想计数器的任意两个相邻脉冲间的时间间隔均不小于 $\tau = \max\{\tau_a, \tau_b, \tau_c\}$, 于是实际光子计数速率为

$$n = N \cdot P(0) = N \cdot \eta \cdot e^{-N\tau} \quad (4)$$

式中 η 是 APD 的量子效率,非线性误差为

$$E = \frac{N - n}{N} = 1 - \eta \cdot e^{-N\tau} \quad (5)$$

当 $\eta = 0.1$, $\tau = 115 \text{ ns}$ 时,由式(4)可模拟得到 PMT 的理论响应曲线,如图 2。

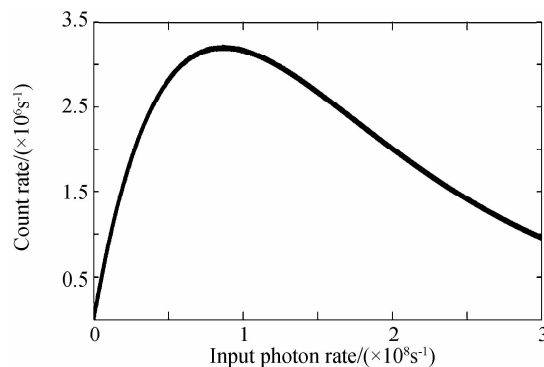


图 2 PMT 的理论响应曲线

Fig. 2 The theoretical response curve of PMT

由图 2 可知,PMT 在入射光子速率较低时保持线性,PMT 在入射光子速率较大时非线性误差较大,且存在一个计数值有二种入射光子速率的可能.

1.3 参量下转换定标单光子探测器实验原理

自发参量下转换是 1970 年在光子计数实验中首先被发现的^[13],在单色泵浦光与量子真空噪声对非中心对称的非线性晶体的综合作用下,一个高频泵浦光子会自发的分裂为两个低频光子,分别称为信号光和空闲光,由于这两个光子具有时间、空间、频率和偏振相关性,因此也被称为相关光子.自发参量下转换发生的条件:只要晶体中参量光的增益大于单次损耗,就能使泵浦光的光子自发分裂成两个相关光子.中心频率为 ω_i 频率带宽为 $d\omega_s$ 的相关光子功率为

$$p_s = \frac{\hbar d^2 L \omega_s^3 \omega_i^2}{\pi c^3 \epsilon_0 n_p^2 \omega_p} P_p d\omega_s = (2\pi)^4 \frac{2\hbar c d^2 L \lambda_p}{\epsilon_0 n_p^2 \lambda_s^5 \lambda_i^2} P_p d\lambda_s \quad (6)$$

泵浦激光产生的单位波长间隔内的信号光谱功率为

$$d\Phi_s = (2\pi)^4 \frac{2\hbar}{\epsilon_0 (n_p^e(\psi))^2} \frac{\lambda_p}{\lambda_s^5 \lambda_i^2} \int_0^L \Phi_p(l) dl d\lambda_s \quad (7)$$

式中, $d\Phi_s$ 是在光谱间隔 $d\lambda$ 内积分获得的信号光子速率, d_{eff} 是有效的二阶非线性系数, $n_p^e(\psi)$ 是相位匹配角为 ψ 时泵浦光折射率, λ_s 、 λ_i 和 λ_p 分别代表信号光、空闲光和泵浦光波长, L 是晶体长度, $\Phi_p(l)$ 为泵浦光在晶体中传输了长度 l 时的功率^[14].假定晶体对泵浦光的吸收可以用比尔定律表示,即

$$\Phi_p(l) = \int_0^L \Phi_p(0) e^{-\alpha l} dl \quad (8)$$

式中 $\Phi_p(0)$ 是泵浦光在晶体入射端面的功率, α 是晶体的吸收系数.将式(8)代入式(7)后,进行波长积分,可得入射光功率和相关光子功率成正比,而入射光子数

$$N_\lambda^{\text{sc}}(\lambda) = \frac{\lambda}{hc} \Phi_s \quad (9)$$

可以得知泵浦光功率与相关光子速率成线性关系,即

$$N = \alpha \Phi_s \quad (10)$$

式中 α 为常数.当光子计数速率较低时,非线性误差接近于零,光子计数速率

$$n = \eta \cdot N = \beta \Phi_s \quad (11)$$

式中 β 为常数,可由泵浦光功率和光子计数速率值得到它们的对应关系.由于不同探测器的量子效率不同,且量子效率是常数,为了方便比较光子计数器的性能,不考虑量子效率的影响,认为每一个光子都能被探测器吸收触发电脉冲,这对探测器的线性测量没有影响.调节入射泵浦光功率,即可改变入射探测器的光子速率的大小,通过测量泵浦光功率和测量的光子计数速率值的关系即可测量探测器的线性.

2 实验装置

根据定标原理,建立了如图 3 所示的实验装置.532 nm 连续单波长激光器作为泵浦光,其最大输出功率为 18 W.泵浦光经起偏器、532 nm 半波片、长焦透镜 1($f=120$ mm)聚焦入射 PPLN 晶体(50 mm×3 mm×1.5 mm)中,晶体后端产生的相关光子经过短焦透镜 2($f=80$ mm)、567 nm 滤光片 1、550 nm 长通滤光片 2 后入射单色仪中,经单色仪的色散入射到 APD 和 PMT.其中 PMT 为滨松公司的 R2949 光电倍增管,光谱响应范围 200~900 nm;APD 为 excelitas 公司的 SPCM-15 雪崩光电二极管,光谱响应范围 400~1 000 nm.

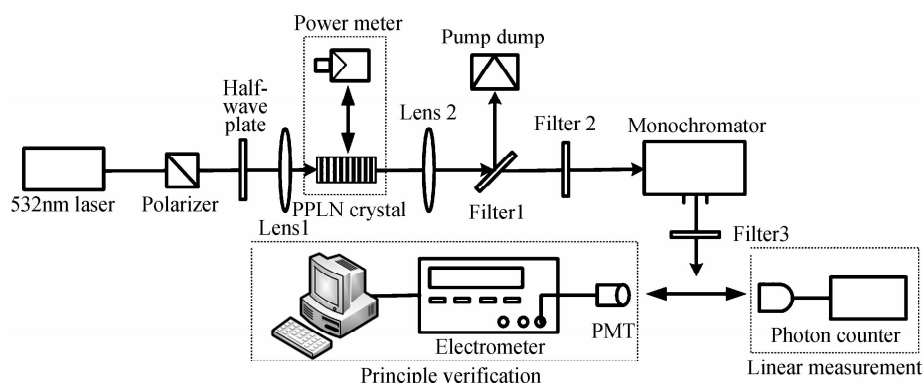


图 3 光子计数器线性测量装置

Fig. 3 The schematic diagram of linear measuring device for photon counter

泵浦光经起偏后变成垂直偏振,满足自发参量下转换准相位匹配要求.光路中插入半波片可改变泵浦光的偏振状态,用于背景扣除.透镜 1 的作用是聚焦泵浦光使泵浦光的光斑直径小于 PPLN 晶体的高度(1.5 mm),保证泵浦光束完全入射 PPLN 晶体.PPLN 晶体和功率计放置在高准确度的二维平移台上,通过

软件控制交替测量泵浦光的功率和探测器测量值,两者测量间隔为 10 s,在 10 s 内泵浦光被认为功率不变.透镜 2 的功能是将产生的相关光子聚焦平行入射单色仪中,576 nm 长通滤光片 1 和 550 nm 的长通滤光片 2 为了残余消除泵浦光,滤光片 1 呈 45° 放置,可避免泵浦光在多片镜子间来回反射增加了背景辐射.为了继

续提高测量信噪比,减小杂散光对实验结果的影响,在探测器的前面放置了 3 mm 的孔径光阑和一个 550 nm 的长通滤光片³.

实验分为泵浦光功率与相关光子数线性关系的系统验证和光子计数器线性测量和修正二部分.首先通过测量泵浦光功率和 PMT 光电流的大小,验证泵浦光功率与相关光子数的线性关系和测量系统的误差大小.由于 PMT 在其工作范围内电流非线性极小^[15-16],因而 PMT 本身的响应非线性对测量结果的影响可以忽略.在图 3 的装置中,单色仪后连接电流模式的 PMT,并将 PMT 的输出信号连接至静电计(KEITHLEY 6517B,其最小测量电流为 20pA),测量 PMT 的光电流大小.调节泵浦光功率可改变晶体产生的相关光子速率,从而使 PMT 获得不同功率下的光电流.

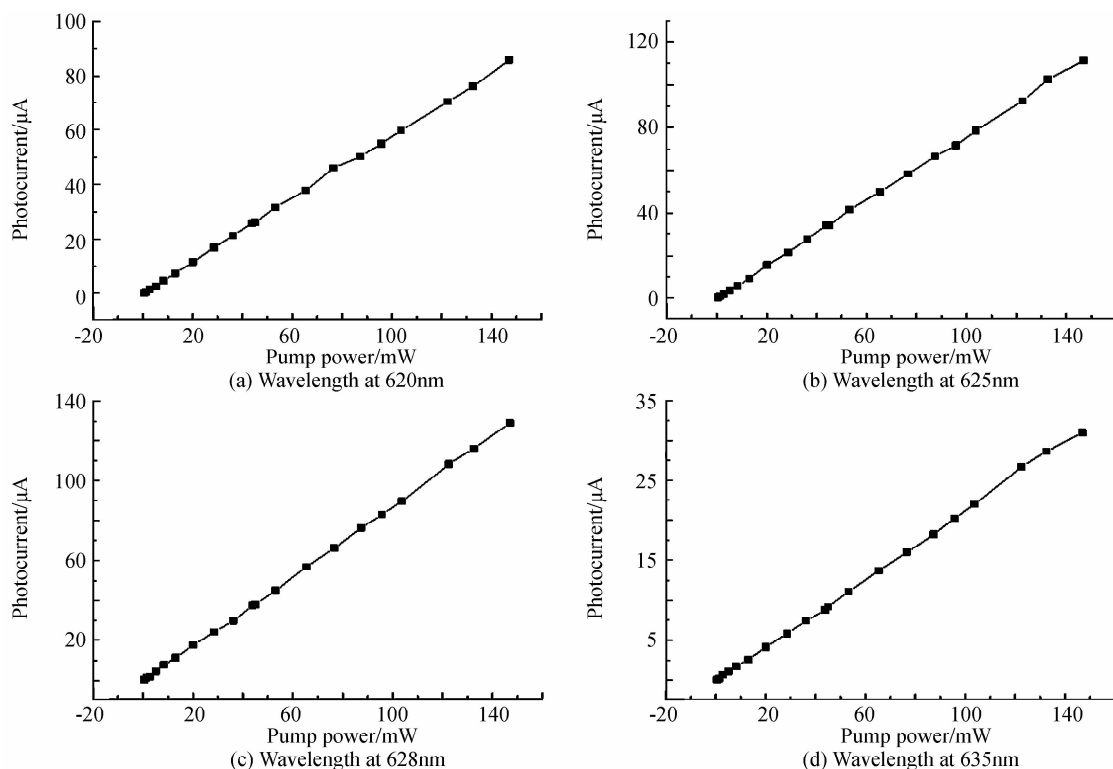


图 4 泵浦光功率和光电流关系

Fig. 4 The photocurrent of PMT versus the Pump power

图 4 为不同中心波长下泵浦光功率与光电流的关系.数据分析可知,泵浦光功率与光电流的线性相关系数大于 0.998 28,系统误差小于 3%.可认为泵浦光功率与产生的相关光子呈线性关系,通过它们的线性关系即可实现光子计数器的线性测量.

3.2 APD 的线性测量和修正

为了方便对比验证,考虑 APD 和 PMT 的波长响应范围和信噪比大小,选取 628 nm 的相关光子入射光子计数器测量光子计数器的线性.光子计数器在光子计数速率较大时非线性误差较大,需要对光子计数进

之后通过调节泵浦光功率测量光子计数器的线性.在单色仪后连接光子计数器(APD 和 PMT),调节泵浦光功率测量光子计数的变化,得到光子计数器的计数值与入射光子速率的关系.为了充分避免背景光从单色仪入射探测器,单色仪和探测器放置在一个密封的黑箱子里.

3 实验结果

3.1 系统验证实验

按照图 3 所示实验装置对光电流进行测量,泵浦激光的功率变化范围为 0.1~150 mW,将泵浦光功率和 PMT 光电流交替测量,间隔时间为 10 s,以获取不同功率下探测器的光电流输出.调节单色仪选取不同波长的相关光子输出,得到结果如图 4.

行修正. APD 由式(1)进行修正, T_d 是 APD 的死时间,可通过实验进行测量得到.一般情况下,调节进入探测器的光强到 APD 光子计数速率基本不增加,此时用示波器观察输出波形,二个相邻脉冲的最小时间间隔即是 APD 的死时间 T_d ,可表示为

$$T_d = \frac{1}{(R_{\text{measure}})_{\text{max}}} \quad (12)$$

测得死时间 T_d 为 26 ns,与出厂数据相同.

按照实验装置对光子计数器线性进行测量,泵浦光功率变化范围为 0.1~150 mW,泵浦光功率与相关光子速率间隔时间 10s 交替测量,获取不同功率下的

光子计数速率值.将泵浦光功率和光子计数速率转换为入射光子速率和光子计数的关系,得到 APD 的线性测量曲线,通过式(1)进行修正,得到修正后的曲线,如图 5.

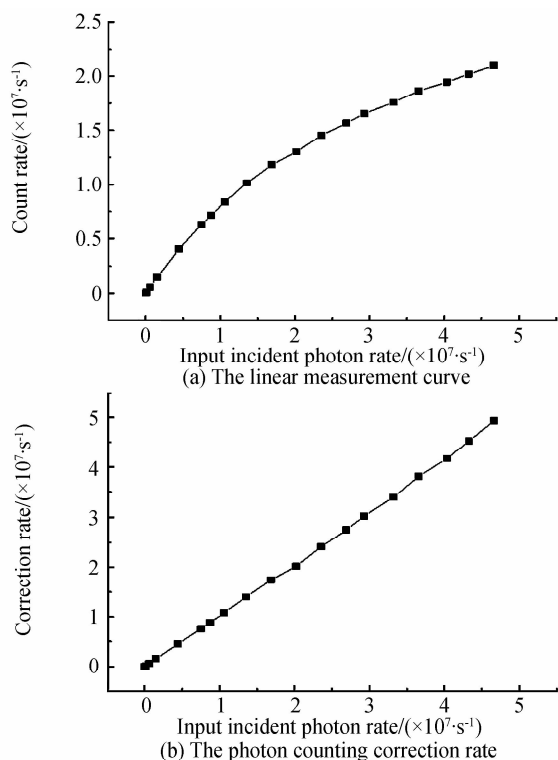


图 5 APD 的线性测量曲线和光子计数速率修正曲线
Fig. 5 The linear measurement curve and the counting correction rate curve of APD

APD 的线性测量曲线和理论响应曲线(图 1)基本符合.由实验结果可知,APD 当入射光子速率小于 $1 \times 10^5 s^{-1}$ 时,非线性误差小于 1%;入射光子速率越高,非线性误差越大,当入射光子速率为 $1 \times 10^6 s^{-1}$,非线性误差 3%;当入射光子速率大于 $1 \times 10^7 s^{-1}$,非线性误差大于 20%.

修正后,当 APD 光子计数速率小于 $1 \times 10^7 s^{-1}$,修正值与入射光子速率的相对误差小于 3%;APD 光子计数速率小于 $5 \times 10^7 s^{-1}$ 时,修正值与入射光子速率的

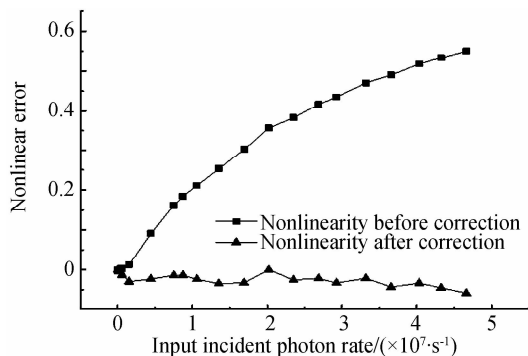


图 6 APD 修正前和修正后的非线性误差曲线
Fig. 6 The nonlinearity before correction curve and nonlinear after correction curve of APD

相对误差小于 5%,可以较为精确地修正计数器的计数值.实验结果出现误差的原因包括高入射光子速率下后脉冲概率的变化以及探测器死时间测量值的不精确.APD 光子计数速率大于 $5 \times 10^7 s^{-1}$ 时,APD 工作不稳定,测量波动较大.APD 的线性测量修正前和修正后的非线性误差如图 6.

若规定 $E=5\%$ 时为光子计数器适用的线性工作范围上限,APD 的入射光子速率最大线性工作范围可由 $2 \times 10^6 s^{-1}$ 扩大到 $5 \times 10^7 s^{-1}$,通过修正可以有效地降低 APD 的非线性误差.

3.3 PMT 的线性测量和修正

PMT 可由式(4)进行修正,由文献[11]得知,PMT 的脉冲分辨时间为 20 ns,计数器死时间为 25 ns,脉冲甄别器的死时间未知,该值可根据式(4)和光子计数速率最大值推出,得 PMT 的脉冲分辨时间为 115 ns.

按照实验装置对 PMT 线性进行测量,泵浦光功率变化范围为 0.5~135 mW,如 APD 的线性测量方法测量 PMT,得到 PMT 的线性测量曲线,再由式(4)修正,得到 PMT 的线性测量曲线和 PMT 的光子计数修正曲线,如图 7.

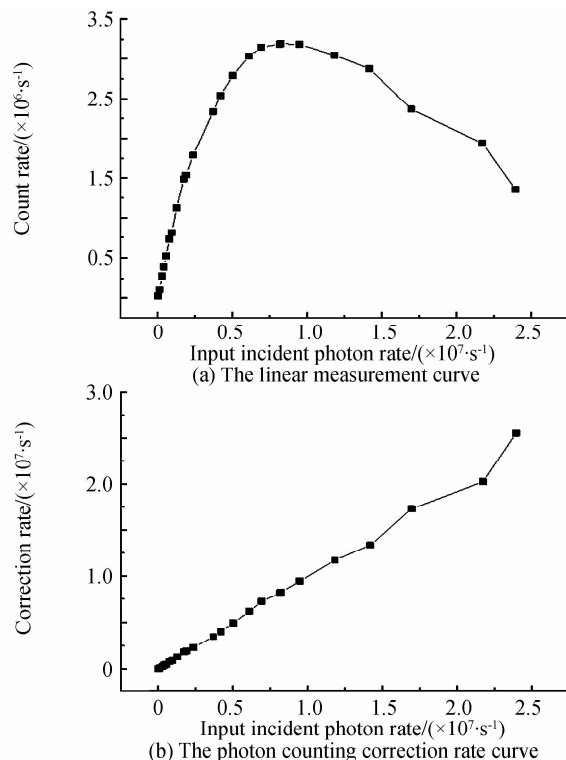


图 7 PMT 的线性测量曲线和光子计数速率修正曲线
Fig. 7 The linear measurement curve and the photon counting correction rate curve of PMT

PMT 的线性测量曲线也和理论响应曲线(图 2)基本符合.当入射光子速率小于 $1 \times 10^5 s^{-1}$ 时,非线性误差小于 2%;当入射光子速率较高时,PMT 的非线性误差远大于 APD 的非线性误差,当光子计数速率 $1 \times 10^6 s^{-1}$ 时,非线性误差大于 20%;当入射光子速率大于

$1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 非线性误差大于 60%。当 PMT 入射光子速率达到一定值时(未超过工作阈值), 光子计数速率逐渐变小, 测量时需注意。

PMT 通过修正公式也可修正计数器的计数值, 当 PMT 光子计数速率小于 $1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 修正值与入射光子速率的相对误差小于 3%; PMT 光子计数速率小于 $1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 修正值与入射光子速率的相对误差小于 5%; PMT 光子计数速率大于 $1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 相对误差小于 10%。出现误差主要原因包括 PMT 光子接收分布概率不完全适用泊松分布模型以及 PMT 的甄别时间测量值的不精确。PMT 的线性测量修正前和修正后的非线性误差如图 8。

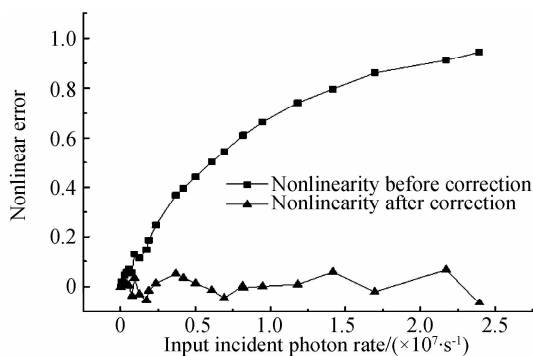


图 8 PMT 修正前和修正后的非线性误差曲线

Fig. 8 The nonlinearity before correction curve and nonlinear after correction curve of PMT

若规定 $E=5\%$ 时的为 PMT 适用的线性工作范围上限, PMT 的入射光子速率线性工作范围上限可由 $2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 扩大到 $1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 通过修正可以有效地降低 PMT 的非线性误差。

4 结论

本文依据自发参量下转换过程中泵浦光功率和产生的相关光子速率的线性关系, 搭建了单光子计数器线性测量的实验装置, 从而实现光子计数器线性的测量。实验结果表明, 该系统可以有效地实现光子计数器的线性测量, 光子计数器在光子计数速率较大时非线性误差较大, 需要对光子计数进行修正。通过修正可有效地减小光子计数的非线性误差, 并指导光子计数探测器的器件选型和线性工作区域选定。影响光子计数线性测量的因素是多方面的, 本文仅讨论其非线性误差产生的主要原因, 后续将开展进一步的研究。

参考文献

[1] SU Bi-da, WANG Jing-feng, MA Xue-song, *et al.* Measurement of the photon emission characteristic of silicon avalanche photodiode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1):0125003.
苏必达, 王景峰, 马雪松, 等. 大气背景下盖革模式 APD 激光雷达探测性能计算[J]. 光子学报, 2015, **44**(1):0125003.
[2] SHEN Shan-shan, CHEN Qian-he, HE Wei-ji, *et al.*

Research on performance of random bitstream ranging system based on single photon detection theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(10):1012001.
沈姗姗, 陈钱和, 何伟基, 等. 基于单光子探测机理的伪随机码测距性能研究[J]. 光学学报, 2014, **34**(10):1012001.
[3] KARAMI M A, SANI A A, GHORMISHI M H. Tunneling in submicron CMOS single-photon avalanche diodes[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(1): 012501.
[4] YIN Wen-ye, SHI Feng, HE Wei-ji. 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] SHAO Jun-hu, HUANG Tao, WANG Xiao-bo, *et al.* Measurement of the photon emission characteristic of silicon avalanche photodiode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):354-356.
邵军虎, 黄涛, 王晓波, 等. 硅雪崩二极管光子辐射特性的实验研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(3):354-356.
[6] NI Qi-liang, BU Shao-fang, LIU Shi-jie, *et al.* Preconditioning experiment research of microchannel plate photon counting imaging detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 658-662.
尼启良, 卜绍芳, 刘世界, 等. 通道板光子计数成像探测器预处理实验研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(6):658-662.
[7] COMELLI D, ANDREA C D, VALENTINI G, *et al.* Analyzing integrated circuits at work with a picosecond time-gated imager[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(25): 10075-10084.
[8] ZHANG Xiang-xue, ZHANG Li. The method to calibrate a single photon counter[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(24), 561-563.
张祥雪, 张立. 单光子计数器的校验方法研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(24):561-563.
[9] ZHU Ya-yi, YIN Jian-ping, GUO Hua-jian, *et al.* Experimental measurement of stray light in holographic concave grating monochromators[J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(7):577-581.
朱亚一, 印建平, 顾华俭, 等. 全息凹面光栅单色仪杂散光的实验测定[J]. 光学学报, 1984, **4**(7):577-581.
[10] SWYTD A, LAROCK J G. Inverse-fourth apparatus for photometric calibrations[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1978, **49**(8):1083-1089.
[11] YIN Jian-ping. The nonlinear errors and sensitivity of PMT photo counting system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 1985, **6**(3):227-235.
印建平. PMT 光子计数系统的非线性误差及灵敏度[J]. 仪器仪表学报, 1985, **6**(3):227-235.
[12] GAO Yan-lei, LU Xiao-gang, BAI Jin-hai, *et al.* Avalanche luminescence crosstalk between avalanche photodiodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(7): 0727004.
高艳磊, 芦小刚, 白金海, 等. 雪崩光电二极管的雪崩发光串扰研究[J]. 光学学报, 2015, **35**(7):0727004.
[13] BUMHAM D C, WEIGBERG D L. Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs[J]. *Physical Review Letter*, 1970, **25**(2):84-87.
[14] BRIDA G, GENOVESEA M, NOVERO C. On the measurement of photon flux in parametric down-conversion[J]. *European Physical Journal D*, 2000, **8**: 273-275.
[15] WANG Hai-ke, LU Yun-peng. Characteristics and application of photoelectric magnification tube[J]. *Instrumentation Analysis Monitoring*, 2005, **1**: 1-4.
王海科, 吕云鹏. 光电倍增管特性及应用[J]. 仪器仪表与分析监测, 2005, **1**:1-4.
[16] WEI Fu-li, WANG Pei-wei, YUAN Yuan, *et al.* The study of linear current extension of PMT[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*. 2011, **31**(9):986-990.
魏福利, 王培伟, 袁媛, 等. 光电倍增管线性电流扩展研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(9):986-990.