

纠缠光子法绝对定标光电探测器量子效率的研究

吕 亮^{1,2} 张寅超¹ 林延东²

(¹ 北京理工大学光电学院, 北京 100086
² 中国计量科学研究院光学所, 北京 100013)

摘要 为了应对国际上“坎德拉”新定义的动作,开展了利用纠缠光子法测量光电探测器量子效率的研究,并建立了测量装置。装置采用 351.1 nm 连续激光抽运 BBO 晶体产生纠缠光子场,然后通过双通道门控计数器组成的符合测量系统在 702.2 nm 和 788.7 nm 两个波长点对光电倍增管的量子效率进行了测量。同时对单光子脉冲信号获取、噪声抑制及提取、符合时间特性、偶然符合、暗背景计数和器件透过率等影响测量结果的关键因素进行了实验分析并给出了修正分量,最终在两个波长点量子效率测量不确定度小于 0.7%。

关键词 测量;自发参量下转换;纠缠光子;符合计数;量子效率

中图分类号 TP211.6; TH724 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0112004

Research on Absolute Calibration of Photodetector Quantum-Efficiency Using Entangled Photons

Lü Liang^{1,2} Zhang Yinchao¹ Lin Yandong²

(¹ School of optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100086, China
² Optic Division, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract In response to the new definition of "Candela", the research on measurement of photodetector quantum efficiency (QE) with entangled photon method is carried out, and a complete QE measurement setup is established. From a Type-I phase match BBO crystal pumped by a 351.1 nm CW laser, the correlated photons are generated, photomultiplier tube (PMT) QE is calibrated at 702.2 nm and 788.7 nm based on the coincidence count system which is realized with a dual-channel gated photon counter. At the same time, the key factors which influence the QE measurement are analyzed, including single-photon pulse acquisition, noise suppression and extraction, time related character about coincidence, accidental coincidence counts, dark counts, transmittance of optics. In the end, the measurement uncertainty of QE at the two wavelengths is less than 0.7%.

Key words measurement; spontaneous parametric down conversion (SPDC); entangled photons; coincidence counting; quantum efficiency

OCIS codes 120.1880; 120.5630; 190.4975; 190.4410; 040.5160; 040.5250; 230.4320; 230.5298

1 引 言

光辐射计量关心的问题可分为两类:光源及探测器,其中探测器关注的是其量子效率(或响应度)量值。对于探测器量子效率的校准,传统的计量方法包括标准源法和标准探测器法,这两种方法都需要已知量值的计量标准器进行量值传递才能得到被

测探测器量子效率。然而在 1980 年前苏联科学家 Klyshko^[1]提出了利用纠缠光子技术独立进行光电探测器量子效率测量的新方法,使得这种方法成为区别于标准源法和标准探测器法的新技术。利用纠缠光子的时间、动量、能量和波长等相关特性,如果捕捉到纠缠光子对中的一个光子,那么对应的另一

收稿日期: 2011-07-29; **收到修改稿日期**: 2011-08-30

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAF06B05)资助课题。

作者简介: 吕 亮(1978—),男,博士研究生,主要从事微弱光辐射计量方面的研究。E-mail: lvliang@nim.ac.cn

导师简介: 张寅超(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事光电遥感探测理论与技术等方面的研究。

E-mail: ychang@bit.edu.cn

个共轭光子的波长及传播方向也就被唯一确定,然后通过单通道光子计数及纠缠光子对的符合计数即可得到被测探测器的量子效率。进入 90 年代后,美国 NIST、英国 NPL、意大利 IEN 等计量机构纷纷开展了此项研究。尤其是 2007 年欧洲国家的计量机构联合体(EMRP)启动了“量子坎德拉”工程,并已经向国际光度辐射度咨询委员会(CCPR)提出将国际七个基本单位之一的“坎德拉”由原来的功率(W)定义改为光子个数定义^[2],从而过渡到了量子定义的范畴,以提高基本单位复现的客观性和独立性。本文将介绍中国计量科学研究院在此方面的研究进展及成果。

2 纠缠光子法量子效率测量原理

“纠缠光子”又可称为“相关光子”或“孪生光子”,产生于非线性晶体的自发参变下转换(SPDC)过程。自发参变下转换是和频的逆过程,用一束频率为 ω_p 的光抽运非线性晶体后产生频率为 ω_s 和 ω_i 的两个光子,为了有所区分这两个光子一般被称为信号光子和闲频光子。

假定光束是沿 z 方向传播的单体平面波,由三波相互作用的运动方程可以得到^[3]

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{E}_s}{dz} = -i\mathbf{E}_p \cdot \mathbf{E}_i^* \exp(-i\Delta kz) \mathbf{k}_s, \\ \frac{d\mathbf{E}_i}{dz} = -i\mathbf{E}_p \cdot \mathbf{E}_s^* \exp(-i\Delta kz) \mathbf{k}_i, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{E}_s, \mathbf{E}_i, \mathbf{E}_p$ 分别代表信号光、闲频光、抽运光的电场, $\Delta k = k_p - (k_s + k_i)$ 。解以上方程可知只有在 $\Delta k = 0$ 时,也就是满足相位匹配条件的情况下,才可能有持续的下转换光子产生。那么在相位匹配条件下有

$$\omega_p = \omega_i + \omega_s, \quad (2)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i, \quad (3)$$

其中(2)式代表能量守恒,(3)式代表动量守恒关系^[4,5]。

从(2),(3)式中可知,纠缠光子对中的某一个光子被探测到后,另一个光子的产生时间、波长、传播方向、偏振方向都可以唯一地确定下来。下转换产生一个宽带的纠缠光子场,并呈彩色锥体分布,纠缠的一对光子在空间上是一一对应的,如图 1 所示^[1,6]。

在图 2 中如果用探测器 B 和探测器 A 分别予以捕获一对纠缠光子。将 B 通道探测器作为触发(trigger)单元,它每捕获到一个光子,理论上 A 通

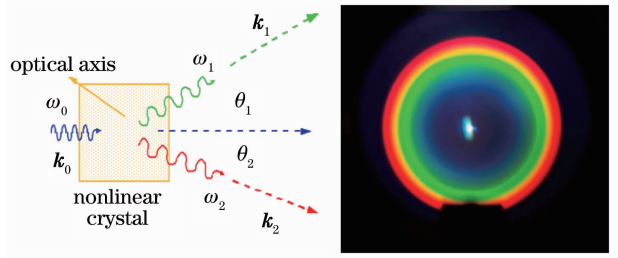


图 1 自发参变下转换双光子产生示意图
Fig. 1 Block diagram of two-photon generation in SPDC process

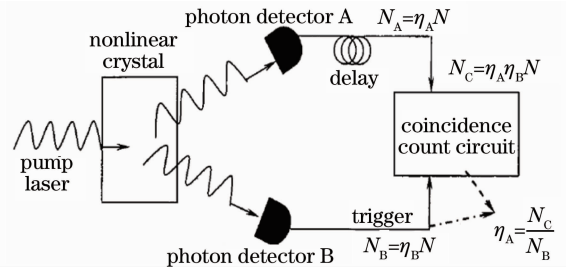


图 2 利用纠缠光子通过符合法测量光电探测器量子效率原理图

Fig. 2 Schematic of photon detector's QE calibration system based on correlated photons and coincidence method

道也将响应另一光子。假设不考虑纠缠光子传播途径中的损耗问题,设 SPDC 过程产生的总光子对个数为 N ,通道 A 和 B 探测器的量子效率分别为 η_A 和 η_B ,那么 A 通道光子计数为 $N_A = \eta_A N$,B 通道的光子计数为 $N_B = \eta_B N$,符合器的符合计数为 $N_C = \eta_A \eta_B N$,很容易得到 A 通道探测器的量子效率表示为^[7,8]

$$\eta_A = \frac{N_C}{N_B}, \quad (4)$$

同样可得到

$$\eta_B = \frac{N_C}{N_A}. \quad (5)$$

(4)式和(5)式的表述是在不考虑光路及光子探测系统影响量条件下的理想公式。但是在实际实验过程中还需要对被测通道光路损耗、偶然符合计数、暗计数参数进行分析,将这些修正量纳入最终的计算结果中,那么被测(DUT)通道的量子效率测量公式可表示为

$$\eta_{DUT} = \frac{1}{T_{BBO} T_{filter}} \frac{N_c - N_{acc}}{N_{trigger} - N_{dark}}, \quad (6)$$

式中 N_c 是在 τ 时间内的符合计数值; N_{acc} 为在 τ 时间内的偶然符合计数值; N_{dark} 为 τ 时间内触发通道

暗计数测量值； T_{BBO} 为从 BBO 内部中心算起到出射面后的透射率； T_{filter} 为被测探测器前端使用的窄带干涉滤光片的透射率。

从基于纠缠光子然后通过符合方法绝对测量量子效率的原理可进一步看出，纠缠光子法不像传统的标准光源和标准探测器方法那样依赖标准器数据进行传递，这种方法可以独立地实现自定标，同时测量得到量子效率量值后，可根据波长、量子效率和单位时间内的光子计数值得到光辐射功率，属于光辐射计量领域的一种新方法。

3 实验装置的设计实现

图 3 为利用 SPDC 过程产生的纠缠光子对绝对测量光子探测器量子效率的装置原理图。由 351.1 nm 氩离子连续激光器作为抽运光，抽运非线性

性晶体。晶体类型为 BBO(I 类相位匹配，切割角度 38.1°)。晶体前采用了起偏器(α -BBO 材质的格兰-泰勒棱镜)及半波片(351.1 nm 双面增透)，用于旋转抽运光偏振方向，以便开关 SPDC 产生需要相位匹配条件，实现关断下转换从而测量暗计数。装置中分别用两个高灵敏度光子探测器对下转换产生的信号光和闲置光进行探测，采用光子计数模式。光子探测器类型为制冷型光电倍增管(PMT)。PMT 信号经过 5 倍放大后由后续符合及单路计数单元采集。装置中起偏器和半波片均被安装在电动旋转机构上以便进行自动扫描，另外两个通道的 PMT 探测器也采用了 3 轴自动调节台，在手动调整水平后自动进行左右平移、升降以及旋转扫描。整套光路系统安装在一个大型密闭暗箱中。

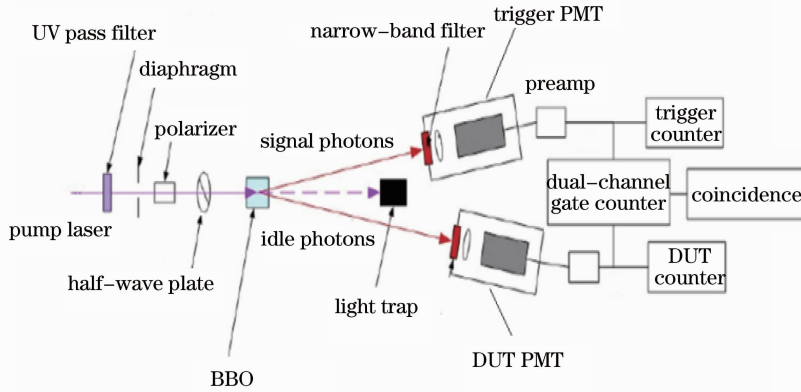


图 3 基于 SPDC 的光电探测器量子效率测量装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of photon detector's QE measurement setup based on SPDC

由于在符合测量中，触发通道的带宽决定着下转换光子波长带宽选择，而 DUT 通道波长选择的原则是尽量将触发通道捕捉到的光子所对应的孪生光子(共轭光子)保证都能探测到。本着以上原则，在触发通道采用了 1 nm 带宽的干涉滤光片和 $\phi 7$ mm 的孔径光阑，使得最终 DUT 通道探测器的量子效率测量波长带宽限制在 1 nm 左右，而 DUT 通道加装了 10 nm 带宽的滤光片，目的是足以收集到触发端响应光子对应的所有共轭光子，同时还可以大幅减小其他波长光子及杂散光子的影响。

按照“符合”的定义，最直接的符合测量系统从原理上可以用“与”门来实现，只有当两个通道同时有光子响应输出才为“1”。那么两路光子探测器的信号可以接入高速“与”门电路，门电路输出可用计数器得到符合计数，也就是两个光子同时发生的计

数。基于以上原理，系统中采用了 SR400 型门控双通道光子计数器来实现符合计数及单通道计数。

利用闲置光子信号直接作为触发信号，同时触发信号经过内部甄别后接入 B 通道计数(设置为连续计数模式)，计数结果为单通道计数值(N_i)；另一路的信号光子探测器放大输出经过 DB64 型延时器(电缆延迟方式)延时(用于补偿仪器固有的从触发到“门”开 25 ns 延迟以及电缆延迟)后接入 A 通道计数器(设置为门控模式，门宽 5 ns)，此时如果触发端有一个光子信号，A 通道“门”开 5 ns，在这 5 ns 时间内如果 A 通道有计数则认为符合一次，最终 A 通道的计数值为符合结果(N_c)。符合系统原理示意图如图 4 所示^[9]。

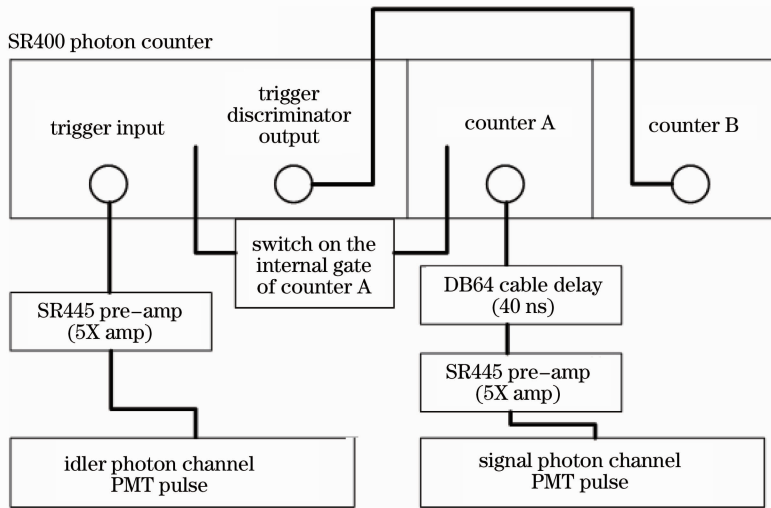


图 4 采用双通道门控光子计数器符合计数原理图

Fig. 4 Schematic diagram of coincidence counting using gated dual-channel photon counter

4 实验结果及不确定度分析

影响量子效率测量结果的因素包括:光子探测系统的信号获取及噪声处理、符合时间特性、偶然符合测量、光路暗计数和光学器件透射比。因此在测量量子效率之前需要对这些关键因素进行实验分析。

4.1 单光子脉冲的噪声抑制及信号提取

对于装置中两个通道的 PMT 器件,在其内部分压网络的信号输出部分采用了 $50\ \Omega$ 电阻及具有优良 $50\ \Omega$ 阻抗的同轴电缆(RG741)进行了阻抗匹配,获取的单光子脉冲波形如图 5 所示。

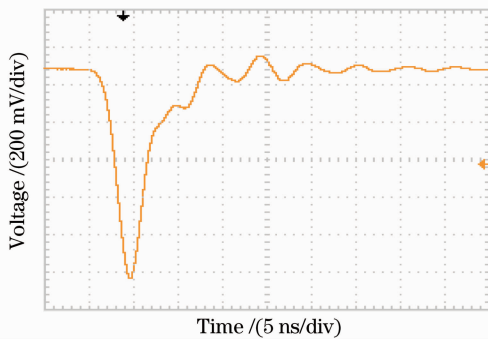


图 5 经过 $50\ \Omega$ 阻抗匹配的单光子脉冲信号波形

Fig. 5 Single-photon pulse waveform with $50\ \Omega$ impedance matching

对单光子脉冲信号进行计数时需要确定甄别阈值,从而将光信号与噪声区分开来。确定合理的甄别阈值前,首要的问题是确定光电倍增管的合理工作高压值,判断方法是将高压设定在倍增管的“坪区”。

对于一支光电倍增管来说,如果保持光源恒定,

测量其计数率与高压值的关系时可以发现:当高压增大时,计数率随着增大。但是当高压继续增大时,会发现计数率进入一个缓慢变化的区域,此区域被称为“坪区”^[10~13],图 6 为利用微弱稳态单色光源对装置所用 PMT 的坪特性进行实验的曲线。

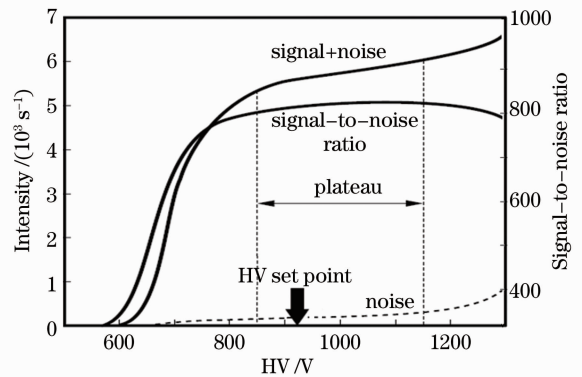


图 6 PMT 坪特性曲线

Fig. 6 Plateau characteristic curve of PMT

装置中使用的光电倍增管极限工作电压为 $1250\ \text{V}$,高压扫描实验表明 $920\ \text{V}$ 即进入“坪区”,鉴于减小倍增管噪声及延长其寿命的考虑,确定了本装置中使用 $1000\ \text{V}$ 高压值。

然后通过获取并依据光电倍增管脉冲高度分布 (PHD) 特性来确定光子脉冲甄别阈值。装置中采用积分式 PHD 分析方法对装置中的两只 PMT 进行脉冲高度分析结果曲线如图 7 所示。

在积分曲线中曲线的拐点就是最佳的阈值设定点^[14~16]。经过实验两个探测器的阈值设定相同,设定值为 $-0.055\ \text{V}$ 。

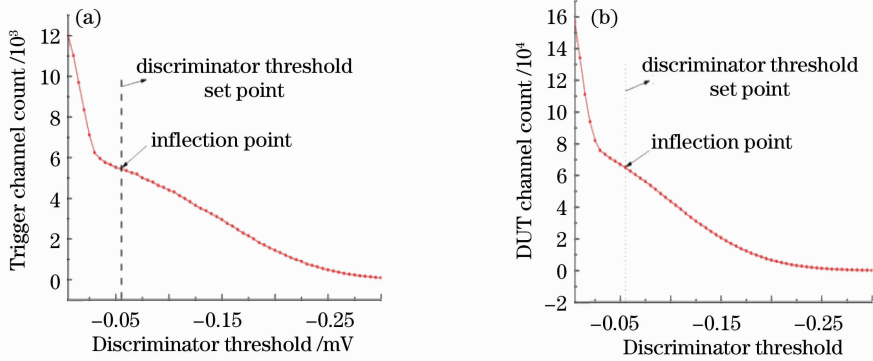


图 7 PMT 脉冲高度分布曲线
Fig. 7 PHD curve of PMT

4.2 符合时间参数的确定

当触发通道有一个光子到达时,门控计数器的门开时刻需要精确定位,而且符合时间窗口宽度需要实验确定。因此对两个通道间的实际延时及符合时间宽度(门开宽度)进行了 1 ns 精度的扫描,数据结果如图 8 所示。

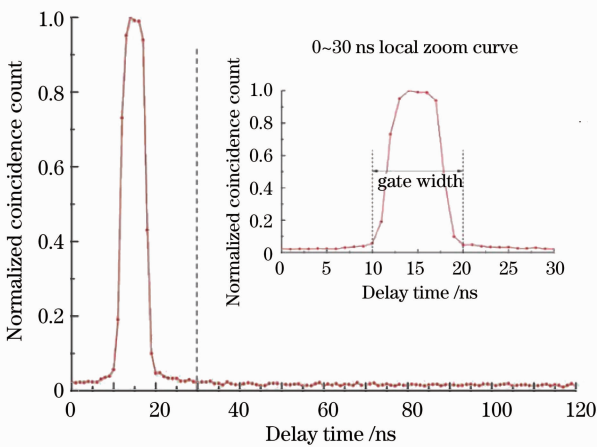


图 8 0~120 ns 延时符合测量结果,延时扫描间隔 1 ns
Fig. 8 Coincidence scan in 0~120 ns range delay scan interval 1 ns

从图 8 结果可以得到 2 点结论:

- 1) 从 10 ns 延时开始,已经明显有符合计数,因此设置的门开时刻为触发信号来临后 10 ns。
- 2) 从 10~20 ns 之间为有效符合区域,考虑到扫描时窗口宽度为 5 ns,因此符合宽度应为 $(20 \text{ ns} - 10 \text{ ns}) + 5 \text{ ns} = 15 \text{ ns}$,最终确定符合时间宽度(门开时间宽度)为 15 ns。

4.3 利用半波片进行暗计数分析

在测量暗计数时将抽运激光关闭后测量是不可取的,实验发现这样会丢失抽运光经过光学器件产生散射而带来的杂散光子计数。在不关闭抽运激光

条件下,仅仅关闭下转换过程测量上述暗计数总和的方法是采用旋转半波片的方法,将入射到晶体的光偏振方向由 e 光转变成 o 光,从而破坏 BBO 产生下转换的相位匹配条件,关断纠缠光子的产生,实现测量所有背景暗计数值。图 9 是旋转半波片扫描确定波片开关准确位置及开关效果的数据曲线,光子计数时间为 10 s。

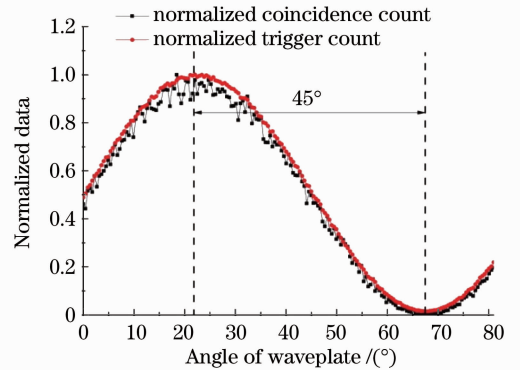


图 9 半波片旋转扫描结果
Fig. 9 Rotation scanning curve of half-wave plate

为了得到更准确的下转换关断计数与下转换开启符合计数的比例,又将计数时间增加到 400 s,长时间计数,分别测量峰和谷两个波片位置的计数值得到表 1 数据。

可以看到 400 s 统计时间内波片将下转换关闭后,符合计数与开启时比例小于 3×10^{-4} ,说明非纠缠光子部分产生的偶然符合很小,在实际测量量子效率时可以忽略,偶然符合测量只对纠缠光子产生的符合进行统计即可。同时需要注意关断后触发通道暗计数占开启时总计数达到 2% 的量级,在量子效率测量过程中作为暗背景扣除。

表 1 400 s 计数时间波片开关光子计数值比较

Table 1 Comparison of photon counts in counting time of 400 s with SPDC on or off controlled by half-wave plate

Test serial	Turn on SPDC		Turn off SPDC	
	Coincidence count	Trigger channel count	Coincidence count	Trigger channel count
1	38561	1449430	6	34416
2	38651	1465479	6	33454
3	39119	1480382	2	32639
4	39089	1477994	5	32267
5	38386	1458783	9	31999

4.4 窄带干涉滤光片及 BBO 的透射率测量

装置中两个探测器灵敏面前都安装了窄带滤光片。针对所测的两对共轭波长,滤光片峰值透射比

波长分别为 702.2 nm(触发)/702.2 nm(DUT)和 632.8 nm(触发)/788.7 nm(DUT)。表 2 是通过分光光度计测量的滤光片光谱透射比数据。

表 2 滤光片透射比数据

Table 2 Filter transmittance data

Filter	Peak wavelength /nm	Peak transmittance /%	50% bandwidth /nm
632.8-trigger	632.8	53.2	1.2
788.7-DUT	788.7	76.8	9.6
702.2-trigger	702.2	85.5	1.0
702.2-DUT	702.2	60.9	9.8

对于非线性晶体引入的光子数损耗来说,实际上在整个晶体内部都要产生纠缠光子,那么如果晶体入射面和出射面透射比特性基本一致的话,可以认为光子是从晶体中心部位产生,并经过一半的晶体厚度出射。由于装置中使用的晶体双面镀有相同的增透膜系、相同工艺、同时镀膜,由郎伯-比尔定律不难推导出光子在 BBO 晶体内部的损失(透射率 T_{photon})可以通过测量晶体的总透射率 T ,然后开根得到,即

$$T_{\text{photon}} = \sqrt{T}. \quad (7)$$

最终采用可调谐钛宝石激光器分别对 702.2 nm 和 788.7 nm 两个波长,按光子出射角度测量 BBO 总透射率。测试结果数据如表 3 所示。

表 3 光子出射方向 BBO 总透射率测量结果

Table 3 Total transmittance data of BBO along the correlated photons propagation direction

Wavelength	702.2 nm(11.13°)	788.7 nm(12.69°)
Total transmittance of BBO /%	91.05	89.98

4.5 量子效率测量结果及不确定度评定

考虑到光学器件的透射率、偶然符合修正和环境暗计数修正因素,DUT 通道探测器的量子效率可由(6)式得到。装置最终实现了在 702.2 nm 和 788.7 nm 两个点对被测通道 PMT 探测器的量子效率进行了绝对定标。其中在 702.2 nm 波长点,

DUT 通道 PMT 的量子效率为 4.50%;788.7 nm 波长点的量子效率为 2.31%。

测量结果的不确定度来源包括:

- 1) BBO 透射率测量不确定度: 0.3%;
- 2) 被测通道 PMT 使用的窄带滤光片透射比测量不确定度: 0.3%;
- 3) 总符合计数测量不确定度;
- 4) 偶然符合计数测量不确定度;
- 5) 单通道总计数测量不确定度;
- 6) 暗背景计数测量不确定度;
- 7) 被测探测器及触发探测器位置重复性测量不确定度。

其中 3)~7)项最终体现在不同次重复性测量结果的重复性中,作为系统的 A 类不确定度项。而 1)和 2)为系统的 B 类不确定度项。两个波长点量子效率测量结果不确定度合成如表 4 和表 5 所示。

表 4 702.2 nm 量子效率不确定度合成

Table 4 Combined standard uncertainty of QE measurement at 702.2 nm

Item of uncertainty	Type	Freedom	Uncertainty /%
BBO transmittance	B	∞	0.3
Filter transmittance	B	∞	0.3
Repeatability	A	9	0.5
Combined uncertainty			0.7

表5 788.7 nm 量子效率不确定度合成

Table 5 Combined standard uncertainty of QE measurement at 788.7 nm

Item of uncertainty	Type	Freedom	Uncertainty /%
BBO transmittance	B	∞	0.3
Filter transmittance	B	∞	0.3
Repeatability	A	9	0.6
Combined uncertainty			0.7

5 结 论

介绍了利用纠缠光子场测量光电探测器量子效率的原理,然后设计实现了一整套实验装置,并对装置重要环节的特性进行了实验分析,给出了各影响量的修正方法,最终实现了在 702.2 nm 和 788.7 nm 两个波长点进行了光电倍增管量子效率的绝对定标,不确定度为 0.7%。

本装置仅限于对光电倍增管器件进行实验定标,在今后的进一步研究中需要对另一种常用的光子探测器——雪崩光电二极管进行实验定标,预期的重要工作包括光子与探测器的耦合方法、耦合光路损失修正等。

另外在将来的工作中需要进一步提高纠缠光子的制备效率,产生较高亮度的光子源,从而提高装置的信噪比。

参 考 文 献

- 1 D. N. Klyshko. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors[J]. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1980, **10**(9): 1112~1120
- 2 J. Y. Cheung, C. J. Chunnillall, E. R. Woolliams. The quantum candela: a re-definition of the standard units for optical radiation[J]. *J. Modern Opt.*, 2007, **54**(2-3): 373~396
- 3 D. N. Klyshko. *Photons and Nonlinear Optics*[M]. New York: Gordon and Breach, 1988
- 4 A. Migdall. Correlated-photon metrology without absolute standards[J]. *Phys. Today*, 1999, **52**(1): 41~46
- 5 A. Migdall. Absolute quantum efficiency measurements using correlated photons: toward a measurement protocol[J]. *IEEE*

- Trans. Instrum. Meas.*, 2001, **50**(2): 478~481
- 6 D. C. Burnham, D. L. Weinberg. Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **25**(2): 84~87
- 7 P. G. Kwiat, A. M. Steinberg, R. Y. Chiao. Absolute efficiency and time-response measurement of single-photon detectors[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(10): 1844~1853
- 8 G. Brida, S. Castelletto, C. Novro. Measurement of quantum efficiency of photodetectors by parametric fluorescence [J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 397~401
- 9 Lü Liang, Lin Yandong. Realization and correction of coincidence counting setup used in correlated photon detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 1005~1012
吕亮, 林延东. 相关光子符合计数的实现及修正[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(5): 1005~1012
- 10 Jiang Yunkun, Shi Baosen, Guo Guangcan *et al.*. Two-photon interference with femtosecond pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 1~3
江云坤, 史保森, 郭光灿 等. 飞秒超短脉冲的双光子干涉[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 1~3
- 11 Feng Yu, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Optical radiometric calibration based on correlated photons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 457~460
冯瑜, 郑小兵, 张伟 等. 基于相关光子的光辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 457~460
- 12 Tian Yonghong, Peng Jinsheng. Phase properties of two two-level atoms interacting with two-mode cavity fields via multiphoton process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 583~591
田永红, 彭金生. 两个原子与双模腔场多光子相互作用过程中光场的相位性质[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 583~591
- 13 Luo Sixing, Yao Li, Yang Bojun. Generation of entangled photon pairs through photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 410~412
罗思行, 姚立, 杨伯君. 利用光子晶体光纤产生纠缠光子对[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 410~412
- 14 Hamamatsu Photonics K. K. Editorial Committee. *Basis and Application of Photomultiplier Tube* [M]. Hamamatsu: Hamamatsu Photonics K. K. Electron Tub Division, 1994. 121~138
- 15 Wang Zhiying. *Principles of Nuclear Electronic Technology*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1989. 230~242
王芝英. *核电子技术原理*[M]. 北京: 原子能出版社, 1989. 230~242
- 16 Zhou Zhicheng. *Fundamentals of Nuclear Electronic Technology* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1980. 317~320
周志成. *核电子学基础*[M]. 北京: 原子能出版社, 1980. 317~320

栏目编辑:何卓铭