DOI: 10.3788/JQO20212701.0202

利用关联光子对多波段标定单光子探测器效率

冯畅1,2，崔亮1,2，苏杰1,2，李小英1,2†[[1]](#footnote-2)

（1．天津大学精密仪器与光电子工程学院，天津 300072；

2．教育部光电信息技术科学重点实验室,天津 300072）

**摘 要**：利用光子晶体光纤中产生的一对波长可分别在750-880 nm和1310-1620 nm范围内连续调谐的量子关联光子，对一台待测单光子探测器在覆盖O，C和L三个通信波段的多个选定波长处进行了量子效率的标定测量。该方法可用于在这三个波段内任意波长处绝对标定单光子探测器的量子效率。

关键词 单光子探测器；量子效率；关联光子对；绝对标定

中图分类号O436 文献标志码 A

0 引 言

单光子探测是一种弱光检测方法，广泛应用于量子信息技术、生物光子学和激光测距等领域[1-3]。单光子探测器的量子效率是指当探测器接收到入射光子流后产生的光子计数与入射光子数的比值。在量子态测量和量子密钥传输等很多应用中，单光子探测器的量子效率是正确可靠地修正测量结果所需的关键参数之一[3-5]。标定单光子探测器效率的常用方法有两种：一种是基于标准辐射源或基于标准探测器的方法，需要建立高精度的初级标准及标准传递链[6-9]；另一种是基于量子关联光子对的自标定方法，也称为绝对标定[10-11]。后者由于不需要标准传递链，因此在实际应用中不再受“标准器”工程可复现性的限制。自从D. N. Klyshko于1980年提出这种绝对标定的方法以来[10]，不同国家的多个小组都开展了利用关联光子对标定探测器效率的理论和实验研究[11-16]，目前已经将测量相对标准不确定度降低到0.17%[17-18]，表明了这种方法的有效性和实用性。

近年来，随着量子信息技术的发展，波分复用技术开始受到人们的关注。采用不同波长的光子作为不同的信道同时传输信息，可以有效拓展量子信道容量。然而，单光子探测器的探测效率通常随波长变化。例如，基于InGaAs/InP雪崩二极管的通讯波段单光子探测器的效率在工作波段边缘具有明显的下降[19]，而超导纳米线单光子探测器的效率则与器件的结构设计和加工工艺密切相关[20]。对基于光纤传输的量子通讯波分复用系统来说，实现对单光子探测器在通讯波段任意波长处的效率标定具有重要意义。然而，目前已报道的用于单光子探测器效率标定的关联光子对，大多波长固定或波长调谐范围有限，可以标定的探测器量子效率的波长范围不足30 nm[15,16,17,21]。

要想实现在通信波段任意波长处绝对标定单光子探测器效率的目标，需要波长调谐范围可覆盖通信波段的量子关联光子对。本文利用具有特殊色散的光子晶体光纤，通过自发四波混频过程产生了波长可分别在750-880 nm和1310-1620 nm范围内连续调谐的量子关联光子对；并利用所产生的光子对，在1310 nm、1350 nm、1550 nm、1570 nm、1590 nm和1610 nm六个选定的通信波段波长处，实现了对一台基于InGaAs/InP雪崩光电二极管的单光子探测器的探测效率标定。

1 实验原理

利用关联光子对绝对标定单光子探测器量子效率的原理如图1所示。关联光子对通过自发光学参量过程产生。常用的光学参量过程有两种，一种是二阶非线性晶体中的自发参量下转换（SPDC）过程[22]，另一种是三阶非线性介质中的自发四波混频（SFWM）过程[23]。在二阶（三阶）非线性介质的自发参量过程中，一个（两个）频率为的泵浦光子湮灭的同时，产生了一对频率为和的光子，这一对光子通常被称为信号光子和闲频光子。由于参量过程满足能量守恒和动量守恒条件，所以信号和闲频光子是成对产生的。当光子对中的一个光子被触发探测器探测到时，就预示了另一个光子的存在[24]。在理想情况下，待测探测器探测到这个光子的几率就是其量子效率。如图1所示，当置于闲频光通道的触发探测器测量到一个光子时，则该探测信号预示与其孪生的信号光子一定会出现在信号通道，置于信号光通道的待测探测器测得这个光子的几率即为其量子效率。



Fig. 1 Schematic of detection efficiency calibration for single photon detectors using correlated photon pairs generated from spontaneous parametric process

图1 利用自发参量过程产生的关联光子对实现单光子探测器效率标定的原理图

在实验中，通常需要在信号光和闲频光通道加入滤波器，以便隔离泵浦光并有效地提取信号光子和闲频光子，如图1所示。闲频通道的触发探测器的单通道光子计数率可表示为[16]

， （1）

其中是光子对产生率，是触发探测器量子效率。是触发探测器所在通道的传输效率，取决于参量过程非线性介质和滤波光学元器件的传输效率。待测探测器经触发后的光子计数率可表示为[17,25]

，  （2）

其中是待测探测器量子效率，是待测探测器所在通道的传输效率，是光子对的收集效率，表征与闲频光子成对产生的信号光子被滤波器收集到的几率，与泵浦光频谱、参量过程的位相匹配条件，以及信号和闲频光通道的滤波器有关。公式（2）中的通常也被称为触发探测器和待测探测器的二重符合计数率，也即信号和闲频光子对的真符合计数。由公式（2）可得待测单光子探测器量子效率的表达式

， （3）

由公式（3）可以看出，若已知触发待测探测器通道的传输效率，并使收集效率满足的条件，即可通过测量符合计数率与触发探测器单通道光子计数率之比，得到待测探测器的量子效率。因此，使收集效率是标定探测器量子效率的关键环节。对于块状二阶非线性晶体中的SPDC过程来说，下转换的信号光子和闲频光子空间模式复杂，由多种原因引起的“纠缠角”使探测器效率标定实验的光路调整既复杂又繁琐[11]。而对于具有波导结构的非线性介质，特别是当波导只支持一个空间模式时，产生关联光子对空间模式即为波导传输模式，具有空间模式纯净的优点，便于收集。另一方面，对于单频光泵浦的参量过程，所产生的关联光子对呈现完美的频率反关联；而当泵浦光为具有一定谱宽的锁模脉冲激光时，关联光子的频谱特性较为多样，取决于介质色散和泵浦光带宽等因素[26,27]。但是脉冲泵浦光的优势在于可精确地定义光子对的产生时间，有利于实现实验系统中不同探测器之间的同步。

实验中选择光子晶体光纤作为非线性介质，并采用脉冲光作为泵浦。所产生光子对的空间模式为纯净的高斯模，可与具有光纤输入端口的滤波装置和探测器高效耦合。虽然由脉冲光泵浦所带来的频谱复杂性给关联光子对的有效收集带来一定的困难，但是收集效率仅由光子对的联合频谱分布以及滤波装置的透射谱决定。若使闲频光通道滤波带宽远小于信号光通道滤波带宽，即可满足的条件[25]。



2 实验过程和结果

本文标定单光子探测器效率的实验装置如图2（a)所示。实验中，波长可大范围调谐的关联光子对由脉冲光泵浦一根长度为25 cm的光子晶体光纤（NL-5.0-1060, Crystal Fibre），通过其中的SFWM过程产生[28]。在SFWM过程中，来源于强泵浦光的两个频率为的泵浦光子通过光子晶体光纤中的三阶非线性散射成频率分别为和的信号和闲频关联光子对。该过程既满足能量守恒条件：,也满足相位匹配条件：,其中为频率处的波矢，下标分别表示泵浦、信号和闲频光场。实验中所用光子晶体光纤的纤芯直径约为5.5 μm，包层空气比约为31.5%。图2(b)是根据光子晶体光纤结构参数、利用阶跃光纤模型计算并得到实验验证的四波混频相位匹配曲线[28]。可以看出，当泵浦光波长在1 μm附近时，信号光子和闲频光子的波长会随泵浦中心波长的改变而显著变化。当泵浦光中心波长在1028 nm至1055 nm范围内变化时，信号光子波长的变化范围为1260 nm至1625 nm，覆盖 O、E、S、C 和 L 波段；同时闲频光子波长的变化范围为750 nm至900 nm。



Fig. 2. (a) Experimental setup. (b) Phase matching wavelength of SFWM.

F: Filter, PCF: Photonic Crystal Fiber, LPF: Long Pass Filter, M: Mirror, CWDM: Coarse Wavelength Division Multiplexer, SPD: Single Photon Detector;

图2 (a) 实验装置图，(b) 四波混频相位匹配波长

F:滤波器, PCF: 光子晶体光纤, LPF: 长通滤波器, M: 反射镜，CWDM: 粗波分复用器，SPD:单光子探测器；

标定单光子探测器效率的实验装置如图2（a)所示。泵浦源为一台掺Yb光纤锁模脉冲激光器，所输出激光脉冲的重复频率为62.6 MHz，最大平均输出功率约180mW，中心波长约为1042 nm，10dB频谱宽度大于25 nm。实验中，激光器的输出经过3 dB带宽为1.2 nm的可调谐滤波器F1进行滤波，获得了脉宽约为1.3 ps、中心波长可在1028 nm到1055 nm的范围内连续调谐的泵浦光。这样，通过改变输入光子晶体光纤的泵浦光的中心波长即可实现信号和闲频光子波长的连续调谐。此外，由于信号（闲频）光子与泵浦光的频率失谐大于50 THz，超出了光纤中拉曼散射的增益范围，因而可以有效避免拉曼散射对实验结果的影响[29-31]。

关联光子对的联合频谱函数 表示产生一对频率分别为和的信号和闲频光子的几率，由泵浦光的频谱和位相匹配函数的乘积决定[27,28]。图3(a)是当泵浦光中心波长为1034.2 nm时，光子晶体光纤输出的信号与闲频光子的联合频谱函数，此时信号光子和闲频光子的中心波长分别为1550 nm和776 nm。计算和实验结果表明，当泵浦光中心波长改变时，联合频谱函数的波段范围会相应改变，但频谱关联特性与图3(a)相比变化不大。若闲频光通道的频谱宽度很窄，且信号光频谱带宽大于泵浦光的5倍时则可以满足使公式（3）中的系数[16]。

光子晶体光纤中，自发四波混频的产生效率较低，每个脉冲中的泵浦光子数约为108光子对的产生率为每脉冲0.0001对，所以在测量时，滤波器对脉冲泵浦光的隔离度应大于120dB[28]。在光子晶体光纤的输出端，首先利用长波通滤光片LPF1（截止波长950 nm）和长波通滤光片LPF2（截止波长1250 nm）分别将信号光、闲频光、以及剩余泵浦光所在波段在空间上进行分离；然后将闲频光和信号光分别通过波长可调谐滤波器F2和粗波分复用滤波器CWDM进行滤波。F2由两个光栅构成，3 dB带宽为0.9 nm；CWDM包含16个输出通道，通道的中心波长从1310 nm至1610 nm依次递增，相邻通道中心波长间隔为20 nm，每个通道的3 dB带宽约为18 nm。图3(b)为F2和CWDM一个输出通道的归一化透射谱。经滤波后，信号光子通道和闲频光子通道对泵浦光的隔离度大于130dB，因此残余泵浦光子对实验结果的影响可忽略。为了说明光子对经过滤波器后的频谱特性，图3(a)中用一对虚线表示闲频光通道滤波器的带宽，一对实线表示信号光通道滤波带宽。可以看出，信号通道滤波器的带宽远大于与闲频光子成对产生的信号光子的频谱。因此，在测量过程中满足应用公式（3）时所需满足的条件：。

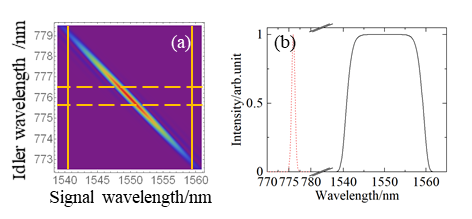


Fig. 3. (a) Contour plot of the joint spectral function of photon pairs; (b) Normalized transmission profiles of the signal and idler filtering channels.

图3 (a) 关联光子对联合频谱函数；(b) 闲频和信号光子滤波通道归一化透射谱

实验中的触发探测器为光纤耦合的、基于Si雪崩二极管的单光子探测器SPD1（SPCM-AQRH，Excelitas）。SPD1工作于自由运转模式。待测探测器是光纤耦合的、基于InGaAs/InP雪崩二极管的单光子探测器SPD2，工作在门模盖革模式，门脉冲的宽度为2.5 ns。图2（a）中的插图为时间延迟扫描得到SPD2的计数率随时间变化，可以看出门模盖革模式下探测器仅在门脉冲的中心处具有最高量子效率，门脉冲的实际半高宽为(0.62±0.02) ns。SPD2的触发信号来源于SPD1。实验中光子对的产生率比较低，SPD1的计数小于10 kHz，因此SPD2的后脉冲效应可以忽略。

实验首先标定SPD1在1550 nm处的效率。将F1和F2的中心波长分别调整为1034.2 nm和776 nm，同时将CWDM中心波长为1550 nm的通道接入SPD2的输入端口。实验中，测得的信号光滤波通道的传输效率。在标定过程中，记录不同平均泵浦功率下，SPD1测得的闲频光子计数率，以及SPD1和SPD2的两重符合计数率。符合计数不仅记录信号光子和闲频光子来源于同一泵浦光脉冲的情况，也通过给SPD2的触发信号加入一个脉冲延时的方式，记录信号光子和闲频光子分别来源于相邻脉冲的情况，也即随机符合计数。两种情况下的符合计数之差即为关联光子对的真符合计数[16]。图4(a)和(b)中的圆点表示不同泵浦功率下已减去探测器暗计数后的和。待测探测器的量子效率可由任意一个泵浦功率下测量得到的和经传输效率修正后获得。为了减小误差，利用四波混频过程中的光子对产生率与泵浦功率平方成正比的关系[28]，对不同功率下的测量结果使用最小二乘法进行二次单项式拟合，拟合结果如图4中的实线所示。对于及，拟合得到的二次项系数分别为和。该误差为拟合过程得出的相应系数的标准偏差。由于光子晶体光纤在1310 nm和1550 nm通讯波段的传输损耗小于 0.016 dB/m, 25 cm光子晶体光纤中的损耗可以忽略。将拟合系数代替对应的计数率，并与信号光子滤波通道传输效率和一同代入公式(3)，即可得待测探测器SPD2在1550 nm处的探测效率。为了验证测量结果的准确性，将其与采用零色散位移光纤产生的频率简并通讯波段光子对标定的结果进行了比较[16]。二者的测量结果一致，而本文的测量结果由于不受拉曼散射的影响，因而标准偏差比文献[16]中的小。

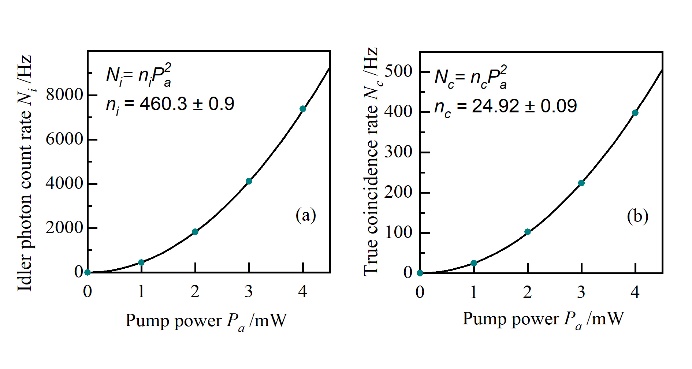


Fig.4. (a)Count rates of idler photons and (b) true conincidence versus average pump power.

The data points are measured results, and the solid curves are fitting results

图4 (a)闲频光子计数率和(b)真符合计数率随平均泵浦功率变化的结果。数据点为测量值，实线为利用二次单项式拟合结果。实验中，泵浦光，闲频光和信号光的中心波长分别为1034.2 nm，776 nm和1550 nm

接下来在 1310 nm、1350 nm、1570 nm、1590 nm和1610 nm五个波长处，对待测探测器SPD2的探测效率进行标定测量，在这五个波长所在波段，光子晶体光纤的传输损耗可以忽略不计，信号光滤波通道的传输效率即为信号光的总传输效率。对于每一个待标定波长，首先确定其对应的泵浦光中心波长和闲频光子中心波长，并相应调整F1和F2的中心波长。根据图2（b）的SFWM相位匹配曲线，上述待标定波长对应的泵浦中心波长分别为1052.4 nm、1049.8 nm、1032.5 nm、1031.0 nm和1029.4 nm。然后，将CWDM的对应端口接入信号光子滤波通道，并将可调谐滤波器F2的中心波长调谐至对应的闲频光子中心波长，重复前述标定1550 nm处探测效率时采用的测量步骤，得到待测探测器SPD2在不同波长处的探测效率，结果如图5中实心圆点所示。可以看出，SPD2在1.31μm波段的探测效率要高于1.55μm波段，例如其在1310 nm处的探测效率可达(18.2±0.2)%；而在1.55μm波段，其探测效率随着波长增加而快速下降，例如其在1610 nm处的探测效率仅为(7.2±0.1)%。这些特征与基于InGaAs/InP雪崩二极管的单光子探测器的典型响应曲线符合。

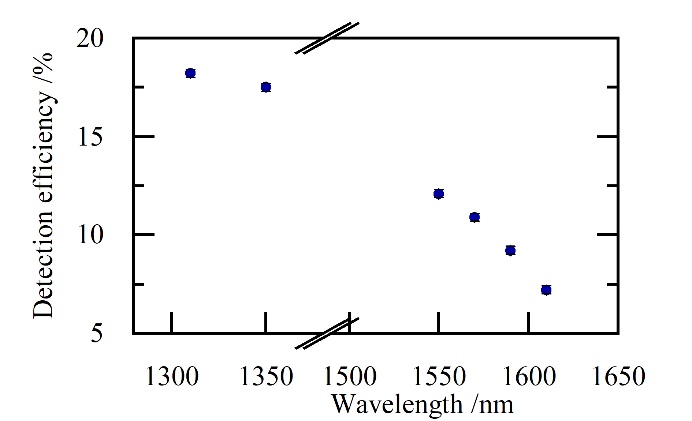


Fig. 5. Measured detection efficiency of single photon detector 2 at different wavelengths

图5 单光子探测器SPD2在不同波长处的探测效率测量结果

为了验证绝对标定结果的可靠性，将其与传统的基于标准探测器标定方法的测量结果进行了对比。参照文献[32]中的方法，利用衰减器对一定功率的激光衰减后对待标定探测器进行测量。由图2(a)中的插图可知，工作在门模盖革模式下的待测探测器，在门脉冲中心时探测效率最高。在利用传统方法测量时，首先使用锁模激光器对1550nm处的SPDUT量子效率进行标定，脉冲光的3dB带宽为0.8nm，脉宽约为4ps，远小于门宽，因此测量结果即可认为是门脉冲中心处的探测器量子效率。实验中，将由功率计量定的平均功率为11.64μW、重复频率50MHZ的弱脉冲光发送通过衰减器，在1550nm处其衰减约为(-76.6±0.3) dB。在这种情况下，入射到SPDUT上的光强度为(0.042±0.009)光子/puls。经过测量得出单光子探测器的量子效率为，与根据图4数据计算得到的SPDUT效率一致。然而，由于功率计本身的不确定度以及激光器输出功率的抖动，标准偏差大于绝对标定测量结果。随后利用可调谐的连续光激光器验证其他波长处探测器效率的变化情况。采用连续光时，测量值虽然不能直接反映门脉冲中心处的探测器效率，但是仍能很好地反映效率随波长的变化趋势。实验时，调节激光器的输出功率，使不同波长时入射单光子探测器的光子数固定在(0.10±0.04) 光子/2.5ns，测量得到单光子探测器在其他波长处的相对量子效率与使用关联光子对测得的趋势一致，说明了本文测量结果的有效性。

3 结 论

利用中心波长可调谐脉冲激光泵浦光子晶体光纤而产生的波长可大范围连续调谐的关联光子对，对一台基于InGaAs/InP雪崩光电二极管的单光子探测器在通讯波段1310 nm、1350 nm、1550 nm、1570 nm、1590 nm和1610 nm六个CWDM中心波长处的量子效率进行了标定。1550 nm处的量子效率标定结果与采用衰减脉冲激光测量结果一致。其它波长处相对于1550 nm的效率，则与使用衰减连续光测量得到的效率曲线相符合，显示了标定测量结果的正确性。本文采用的标定方法也可用于测量其它类型单光子探测器的量子效率。在本文标定单光子探测器量子效率的六个波长处，光子晶体光纤的传输损耗可忽略不计，若对光子晶体光纤不同波长处，尤其是在受氢氧根离子（OH-）吸收影响引起的效率降低的1370-1430nm波段的传输效率进行精确标定，则可在光子对可达到调谐范围内（1310-1620nm）的任意波长处时，对单光子探测器的量子效率进行绝对标定[28]；若增大关联光子对的波长调谐范围，例如将信号光子波长拓展至2μm波段，则可相应地进一步扩展探测器量子效率的标定波长范围。

**参考文献**

1. N. Gisin, G. G. Ribordy, W. Tittel, *et al*. Quantum cryptography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, **74**:145-195. DOI: 10.1103/RevModPhys.74.145.
2. 马建平, 尚建华, 孙嘉曈, 等.基于高速脉冲调制和回波采样的激光测距系统[J].中国激光. 2019, (8):282-288. DOI: 10.3788/CJL201946.0810004.

Ma J P, Shang J H, Sun J T, He Y, Luo Y. Laser Ranging System Based on High-Speed Pulse Modulation and Echo Sampling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, **46**(8): 0810004 DOI: 10.3788/CJL201946.0810004.

1. Bouwmeester D, Mattle K, Pan J W, *et al*. Experimental quantum teleportation of arbitrary quantum states[J], *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 1998, **67**:749-752. DOI: 10.1007/s003400050575.
2. Achilles D, Silberhorn C, Walmsley I A. Direct, Loss-Tolerant Characterization of Nonclassical Photon Statistics[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(4):043602. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.043602.
3. Li J, Su J, Cui L, *et al*. Generation of pure-state single photons with high heralding efficiency by using a three-stage nonlinear interferometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, **116**(20):204002. DOI: 10.1063/5.0003601.
4. Sapritsky V I. Black-body radiometry[J]. *Metrologia*, 1995, **32**(6):411. DOI: 10.1088/0026-1394/32/6/2.
5. Tsai B K. Developments for a New Spectral Irradiance Scale at the National Institute of Standards and Technology[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards & Technology*, 1997, **102**(5):551-558. DOI: 10.6028/jres.102.036.
6. 谢臣瑜, 翟文超, 李健军, 等.基于超连续激光-单色仪的绝对辐亮度响应度定标[J].光学学报. 2019, (7):187-193. DOI: 10.3788/AOS201939.0714002.

Xie C Y, Zhai W C, Li J J, *et al*. Absolute Radiance Responsivity Calibration Based on Supercontinuum Laser and Monochromator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(7): 0714002.DOI: 10.3788/AOS201939.0714002.

1. 张梦雅, 袁银麟, 翟文超, 等.宽动态范围红外积分球辐射源的设计与检测[J].光学学报. 2019, (6):180-189. DOI: 10.3788/AOS201939.0612006.

Zhang M Y, Yuan Y L, Zhai W C, *et al*. Design and Test of Infrared Integrating Sphere Radiation Source with Wide Dynamic Range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(6): 0612006. DOI: 10.3788/AOS201939.0612006.

1. Klyshko D N. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors[J], *Sov J Quantum Electron*, 1980, **10**:1112-1116. DOI:10.1070/QE1980v010n09ABEH010660.
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**:1549-1557. DOI: 10.1080/09500340408235292.
3. Rarity J G, Ridley K D, Tapster P R. Absolute measurement of detector quantum efficiency using parametric downconversion[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**:4616-4619. DOI:10.1364/AO.26.004616.
4. Migdall A L, Datla R U, Sergienko A. *et al*. Absolute detector quantum-efficiency measurements using correlated photons[J]. *Metrologia*, 1995, **32**:479-483. DOI:10.1088/0026-1394/32/6/15.
5. Brida G, Genovese M, Novero C. An application of two-photon entangled states to quantum metrology[J]. *Journal of Modern Optics*, 2000, **47**:2099-2104. DOI: 10.1080/09500340008235132.
6. Chen X H, Zhai Y H, Zhang D. *et al*. Absolute self-calibration of the quantum efficiency of single-photon detectors[J]. *Optics Letters*, 2006,**31**:2441-2443. DOI:10.1364/OL.31.002441.
7. Li X. Ma X, Quan L, *et al*. Quantum efficiency measurement of single-photon detectors using photon pairs generated in optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**:1857-1865. DOI: 10.1364/JOSAB.27.001857.
8. Polyakov S V, Migdall A L. High accuracy verification of a correlated-photon- based method for determining photoncounting detection efficiency[J]. *Opt Express*, 2007, **15**:1390-1407. DOI: 10.1364/OE.15.001390.
9. Polyakov S V . Chapter 8 - Single-Photon Detector Calibration[M]// Experimental Methods in the Physical Sciences. Elsevier B.V. 2013.
10. Quantum sensing, Id221 brochure, [J/OL]. ID QUANTIQUE, 2019, [2019-07-08]. <https://marketing.idquantique.com/acton/attachment/11868/f-023d/1/-/-/-/-/ID221Brochure:pdf>.
11. Gol'tsman G N, Smirnov K, Kouminov P, *et al*. Fabrication of nanostructured superconducting single-photon detectors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, **13**(2): 192-195. DOI: 10.1109/TASC.2003.813678.
12. Avella A, Ruo-Berchera I, Degiovanni I P. *et al*. Absolute calibration of an emccd camera by quantum correlation, linking photon counting to the analog regime[J], *Opt Lett*, 2016, **41**:1841-1844. DOI: 10.1364/OL.41.001841.
13. Burnham D C, Weinberg D L. Observation of Simultaneity in Parametric Production of Optical Photon Pairs[J]. *Physical Review Letters*, 1970: **25**(2):84-87. DOI: 10.1103/PhysRevLett.25.84.
14. Fiorentino M, Voss P L, Sharping J E, *et al.* All-fiber photon-pair source for practical quantum communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(7):983-985. DOI: 10.1109/lpt.2002.1012406.
15. Hong C K, Mandel L. Experimental realization of a localized one-photon state[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56:58-60. DOI: 10.1103/PhysRevLett.56.58.
16. Chen J, Li X, Kumar P. Two-photon-state generation via four-wave mixing in optical fibers[J]. *Physical Review A*, 2005, **72**(3):033801. DOI: 10.1103/PhysRevA.72.033801.
17. Grice W P, Walmsley I A. Spectral information and distinguishability in type-II down-conversion with a broadband pump[J]. *Physical Review A*, 1997, **56**(2):1627-1634. DOI: 10.1103/PhysRevA.56.1627.
18. Garay-Palmett K, McGuinness H J, Cohen O, *et al*. Photon pair-state preparation with tailored spectral properties by spontaneous four-wave mixing in photonic-crystal fiber[J]. *Opt Express* , 2007, **15**:14870-14886. DOI: 10.1364/OE.15.014870.
19. Su J. Cui L, Li X. Wavelength tunable source of correlated photon pairs based on photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **30**:907-910. DOI:10.1109/LPT.2018.2824850.
20. Agrawal G. Nonlinear fiber optics [M]. 5th ed. Elsevier Science, 2012.
21. Li X, Voss P, Chen J, *et al*. Measurement of co- and cross-polarized raman spectra in silica fiber for small detunings[J]. *Optics Express*, 2005, 13:2236-2244. DOI: 10.1364/OPEX.13.002236.
22. 崔亮,李小英,李璐.基于光子晶体光纤的高纯度量子关联光子对的制备[J]. 物理学报. 2012, (5):183-187. DOI: 10.7498/aps.61.054206.

Cui L, Li X Y, Li L. Generation of high purity quantum correlated photon pairs based on photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(5):054206. DOI: 10.7498/aps.61.054206.

1. Oh J, Antonelli C, Tur M, *et al*. Method for characterizing single photon detectors in saturation regime by cw laser[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(6):5906-5911. DOI: 10.1364/OE.18.005906

Efficiency Calibration for Single Photon Detectors in Multiwavelength Using Correlated Photon Pairs

Feng Chang1,2, Cui Liang1,2, Su Jie1,2,Li Xiaoying1,2\*

(1. School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering,

Tianjin University, Tianjin 300072 China;

2. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Tianjin University,

Ministry of Education, Tianjin, 300072, China)

**Abstract:** By using photon pairs generated from photonic crystal fiber, whose wavelengths can be continuously tuned from 750-880 nm and 1310-1620 nm, perform efficiency calibration for a single-photon detector (SPD) at multiple wavelengths covering three telecommands of O, C, and L. This method can be used for calibrating SPDs at any arbitrary wavelength in these three bands.

**Keywords:** single photon detector; quantum efficiency ; correlated photon pairs; absolute calibration

1. **基金项目：**国家自然科学基金(11527808, 91736105, 11874279)、天津市科技计划项目(18ZXZNGX00210)

   **作者简介：**冯 畅（1995—），男，汉族，湖北大冶人，硕士研究生，主要研究方向为离散变量量子光源。E-mail: [fengchang661@tju.edu.cn](mailto:fengchang661@tju.edu.cn)

   **†通信作者：**李小英，E-mail: [xiaoyingli@tju.edu.cn](mailto:xiaoyingli@tju.edu.cn) [↑](#footnote-ref-2)