

doi:10.3788/gzxb20174602.0223001

共线和非共线模式下单光子探测器定标比对实验研究

郭园园^{1,2}, 高冬阳^{1,2}, 胡友勃^{1,2}, 李健军¹, 郑小兵¹, 闫静¹

(1 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)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘 要:采用相关光子法定标单光子探测器的量子效率对提高光学载荷的辐射定标准确度具有重要意义. 利用 355 nm 连续激光泵浦 BBO 晶体产生 I 类自发参量下转换, 在共线和非共线两种相位匹配模式下分别测量了单光子探测器雪崩光电二极管在 736 nm 波段的量子效率. 结果表明, 共线和非共线两种模式测量结果的合成不确定度分别为 0.71% 和 0.39%, 相对偏差均优于 0.4%, 这两种模式都可以定标探测器量子效率, 且具有很好的 consistency. 最后比较了两种模式定标探测器量子效率的优缺点, 该研究为以后利用相关光子法对传感器进行辐射定标提供了晶体相位匹配模式选择的依据.

关键词:光电子; 量子效率; 相关光子; 单光子探测器; 比对; 相位匹配

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)02-0223001-8

Experimental Research on Single-photon Detector Calibration and Comparison for the Collinear and Nonlinear Phase Matching Modes

GUO Yuan-yuan^{1,2}, GAO Dong-yang^{1,2}, HU You-bo^{1,2}, LI Jian-jun¹,
ZHENG Xiao-bing¹, YAN Jing¹

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

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Calibrating the quantum efficiency of the single-photon detector by correlated photon pairs is quite important for improving the radiometric calibration precision of optical load. Using a continuous wave (355 nm) laser to pump BBO crystal to generate type-I spontaneous parametric down conversion, the quantum efficiency of the single-photon detector at 736 nm was measured for the collinear and nonlinear phase matching modes respectively. Results show that, the combined standard uncertainty of calibration result for the collinear and nonlinear modes is 0.71% and 0.39% respectively, the relative deviation is better than 0.4%. and the quantum efficiency of the single-photon detector can be calibrated for the two phase matching modes with an excellent consistence. At the last, the characteristics of the collinear and nonlinear modes was compared. The research provides the basis of choosing crystal phase matching mode for the calibration of remote sensor by correlated photon pairs in the future.

Key words: Optoelectronics; Quantum efficiency; Correlated photons; Single-photon detector; Comparison; Phase matching

OCIS Codes: 230.0040; 230.0250; 040.5160; 030.5260; 190.4410; 040.1345

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

第一作者: 郭园园(1992-), 女, 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: zzugyy@126.com

导师(通讯作者): 李健军(1978-), 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为光学传感器高精度辐射定标. Email: jjli@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2016-09-18; 录用日期: 2016-12-01

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

0 引言

为了实现对全球气候和环境等长期高精度监测的目标,对光学载荷的星上辐射定标准确度提出了更高要求,一些特殊应用如气候观测,要求其测量不确定度优于 0.1%^[1]. 目前传统的两种基于标准辐射源和标准探测器的星上辐射定标方法,无法评估初级标准和标准链路自身的变化,通常稳定在 3~7%,难以再提高. 近年来,一种新型的基于自发参量下转换(Spontaneous Parametric Down Conversion,简称 SPDC)的相关光子定标方法打破了传统方法的限制,它不依赖于任何初级标准以及外部传递标准,理论上可得到更高的定标准确度,目前该方法已经成功用于实验室单光子探测器量子效率定标,并有望用于未来的光学传感器星上定标方面.

SPDC 是泵浦光和非线性介质相互作用产生成对的相关光子. 按照相关光子和泵浦光方向的关系,相关光子定标方法可以分为共线模式和非共线模式^[2-3]. 2007 年,美国 NIST(National Institute of Standards and Technology)报道利用相关光子方法在非共线模式下定标单光子探测器的测量不确定度优于 0.18%,与国际公认的最高准确度的绝对低温辐射计传递量值比较,差异小于 0.14%^[4],这是目前国际上获得的最高准确度;2014 年,中电集团第 41 所利用相关光子法在共线模式下定标单光子探测器雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode,简称 APD)在 780 nm 波段的量子效率为 64.5%^[8],和理论值 64%的相对偏差为 0.8%.

已有报道的相关文献重点介绍了在共线或非共线其中一种模式下的单光子探测器量子效率定标实验,而没有介绍这两种模式实验比对定标结果的相对偏差和两者的一致性. 本文在共线^[8]和非共线^[4]两种模式下,利用相关光子法搭建了两套实验装置,定标了单光子探测器 APD(Excelitas Technologies 公司,SPCM CD 3496 H 30034)在 736 nm 波段的量子效率,比较了两种模式测量结果的相对偏差,以及两种模式对 APD 定标时的优缺点;证明了相关光子定标原理的适用性,为以后开展相关光子法对遥感器进行辐射定标研究提供模式选择依据.

1 相关光子法定标理论

利用相关光子法定标单光子探测器量子效率的原理如图 1. 一束泵浦光入射至非线性晶体后,产生成对的相关光子,这个过程满足相位匹配^[5-6]条件,波长、偏振态、出射方向等具有严格的相关性,探测到一个光子就可以唯一确定另一个光子的存在,这是相关光子能够用于辐射定标的物理基础.

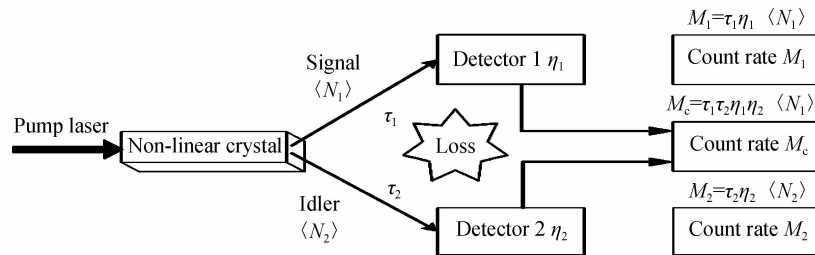


图 1 利用相关光子定标探测器量子效率的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of detector quantum efficiency calibration based on correlated photon

如图 1,两个探测器分别接收信号光子和空闲光子,将光脉冲转化为电脉冲,由计数器计数,计数值分别为

$$M_1 = \tau_1 \eta_1 \langle N_1 \rangle \quad (1)$$

$$M_2 = \tau_2 \eta_2 \langle N_2 \rangle \quad (2)$$

式中, τ_1 、 τ_2 分别是两个通道的光学透过率, η_1 、 η_2 分别是探测器 1 和 2 的量子效率, $\langle N_1 \rangle$ 和 $\langle N_2 \rangle$ 分别是到达探测器 1 和 2 的平均光子数. 由于晶体产生的是成对的相关光子,所以有

$$\langle N_1 \rangle = \langle N_2 \rangle = \langle N \rangle \quad (3)$$

第三个通道记录同时到达两个探测器的相关光子数目为

$$M_c = \tau_1 \eta_1 \tau_2 \eta_2 \langle N \rangle \quad (4)$$

根据式(1)~(4),可知探测器 1 和 2 的量子效率分别为

$$\eta_1 = \frac{M_c}{\tau_1 \times M_2} \quad (5)$$

$$\eta_2 = \frac{M_c}{\tau_2 \times M_1} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知,利用相关光子法得到的探测器量子效率只取决于三个通道的光子计数和光学透过率,该过程不依赖于某个标准,减少了标准传递的累积误差,可以有效提高定标准准确度.

按照信号光、空闲光和泵浦光方向的关系,相位匹配可以分为共线模式和非共线模式.共线模式是指信号光、空闲光和泵浦光的波矢方向一致,非共线模式是指三者的波矢方向存在一定的夹角,如图2.图中 k_p 、 k_s 、 k_i 分别为泵浦光、信号光和空闲光的波矢, Δk 为相位失配量.



图2 共线和非共线模式相位匹配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of collinear and non-linear phase matching mode

自发参量下转换过程满足相位匹配过程,即能量和动量守恒.对于给定的泵浦光波长,不同方向产生不同波长的信号和空闲光子,即有一定的角度分布,如图3(a),图中 $k(\omega_p)$ 、 $k(\omega_1)$ 和 $k(\omega_2)$ 分别为泵浦光、信号光和空闲光的波矢,满足守恒条件; $k(\omega_p)$ 、 $k(\omega'_1)$ 和 $k(\omega'_2)$ 同样满足守恒条件;由于存在相位失配,即使泵浦光和信号光的波矢是固定的,空闲光也有一定的角度展宽.由于晶体长度有限,相位失配引起的相关光子角度展宽明显,如图3(b);由于泵浦光束直径有限,使其波矢有一定的范围,根据相位匹配条件可知信号光和空闲光有一定的角度展宽,如图3(c).由图3可知,空闲光和信号光最终都有一定程度的角度展宽^[7].总的来说,选择更长的晶体和更大光束直径的泵浦光会使相关光子具有更紧凑的输出角度,但是会增加输出相关光子的空间位置范围,增加了光学系统的空间收集难度.因此要权衡影响相位匹配的各方面因素,使收集效率达到最优程度.

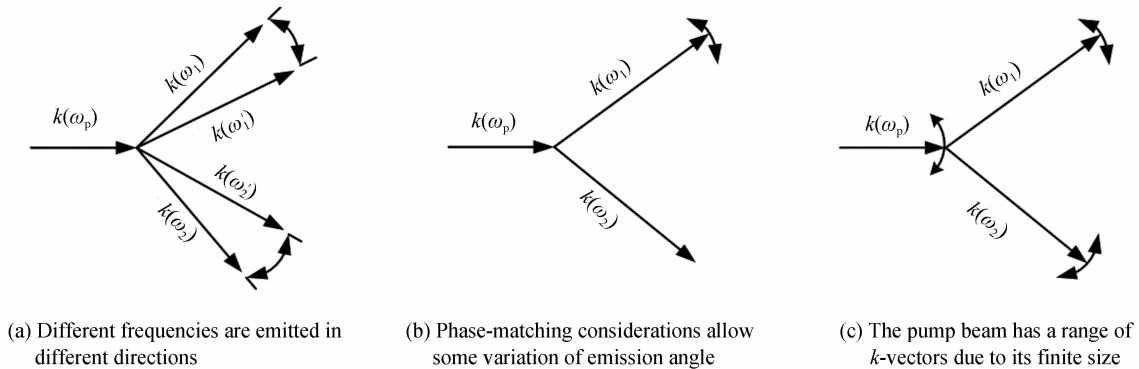


图3 引起相关光子角度展宽的因素

Fig. 3 Several causes for angular spreading in the photons correlated to the trigger

在共线模式下,考虑相位失配,根据动量和能量守恒公式,理论模拟出共线模式下的相关光子出射角度很窄,几乎和泵浦光束同一方向出射,经过聚焦很容易被探测器接收,便于相关光子的定位,但若要将其与泵浦光束中分离出来,存在较大困难;在非共线模式下,相关光子和泵浦光的出射方向在空间位置上是分离的,这便于提高相关光子探测信噪比,但由图3可知,如果选择一定带宽信号光作为触发端,则和触发端对应的相关光子有一定的角度展宽,而且由于晶体具有一定的长度,造成晶体后端面出射的一定带宽内的相关光子经过聚焦后光斑仍旧较大,不容易被探测器接收,增加了探测器的定位难度.

从收集效率角度来说,共线模式更具有优势,从提高相关光子信噪比角度来说,非共线模式更具有优势.通过实验测量两种模式下探测器的量子效率,来分析两种模式的优缺点,根据具体的定标方案选择合适的相位匹配模式.

2 实验装置

在共线和非共线两种相位匹配模式下,利用 355 nm 的激光,制备了 736 nm 和 685 nm 一对相关光子对(各自有一定的带宽),分别搭建了 APD 量子效率定标实验装置.

2.1 非共线模式光路

非共线模式下,单光子探测器在 736 nm 波段处量子效率定标系统的光路如图 4.

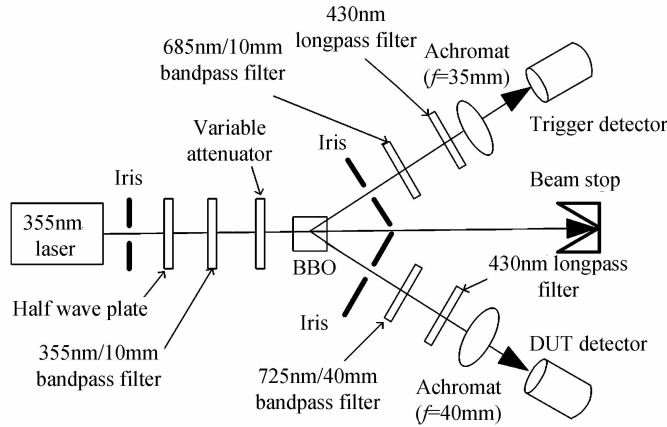


图 4 非共线模式下 APD 量子效率定标光路

Fig. 4 Schematic diagram of optical path for quantum efficiency calibration of APD at nonlinear mode

355 nm 激光器出射的单波长垂直偏振光作为泵浦光.光路中半波片的作用是通过旋转半波片改变激光偏振方向为水平偏振,关闭 SPDC 过程,扣除背景光子计数,可调衰减片的作用是调节激光强度,使产生的相关光子速率在探测器的线性工作区域^[10-11],BBO 晶体尺寸是 8 mm×8 mm×2 mm,切割角为 37°.理论计算 BBO 晶体产生的 736 nm 和 685 nm 相关光子对的出射角度分别为 8.65°和 8.04°,按照图 4 所示光路依次放入光学元件.光路中截止滤光片的作用是消除残余泵浦光,由于相关光子具有一定的出射角度,挡板的作用是滤除空间杂散光和选择所需要的相关光子带宽,触发端挡板孔径(10mm)小于待定标端孔径(15mm)的原因是待定标端孔径要包含所有与触发端相关的光子,带通滤光片是用来选取所需光子,耦合透镜($f=35$ mm)的作用是把相关光子耦合到探测器 APD 内.由于 APD 的光敏面为 μm 量级,所以参考文献[9]中的方法,把探测器放置在高准确度三维调整架上,先调节触发端探测器位置使其输出光子计数达到最大,然后三维调整待定标 APD,使符合计数最大,通过反复扫描找到最佳位置.为了抑制空间杂散光,提高系统信噪比,将 BBO 晶体后的光路放入黑箱子内.

2.2 共线模式光路

共线模式下,单光子探测器在 736 nm 波段处量子效率定标系统的光路如图 5.

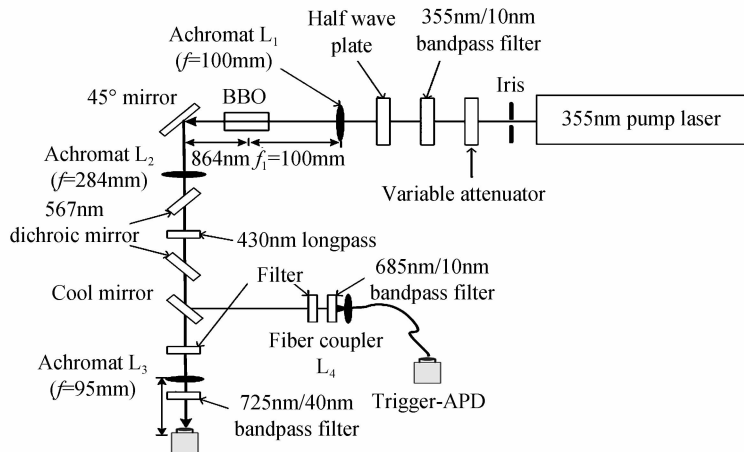


图 5 共线模式下 APD 量子效率定标光路

Fig. 5 Schematic diagram of optical path for quantum efficiency calibration of APD at collinear mode

355 nm 泵浦光经耦合透镜 L_1 入射至 BBO 晶体 ($8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 切割角为 33.1° , 产生 736 nm 和 685 nm 这一对相关光子). 晶体产生的相关光子虽然是共线的, 考虑共线模式相位失配, 理论模拟^[12] 输出角度小于 0.35° . L_1 和 L_2 组成共焦系统, 通过 L_1 把泵浦光聚焦至 BBO 晶体, 提高相关光子产生效率, 减小相关光子发散角; 通过 L_2 使相关光子变成平行光, 减小最终进入 APD 的相关光子光斑尺寸. 光路中镜的作用是分离信号光和空闲光. 选择 685 nm 通道作为触发通道, 使用光纤耦合模式把信号光耦合至 APD, 可以减小杂散光影响, 提高信噪比. 选择 736 nm 通道作为待定标通道, 使用透镜 L_3 把相关光子耦合至 APD, 使其可以完全接收触发通道所对应的相关光子. 725/40 nm 带通滤光片用于保证待定标通道能够包含触发端所对应的相关光子带宽. 按照非共线模式的方法, 反复调节三维调整架, 使触发计数和符合计数达到最大值, 找到最佳位置, 并把整个装置置于黑盒子里, 以减小空间杂散光影响.

2.3 两种模式信号处理

两种模式定标 APD 量子效率时共用一套电学信号处理装置, 如图 6.

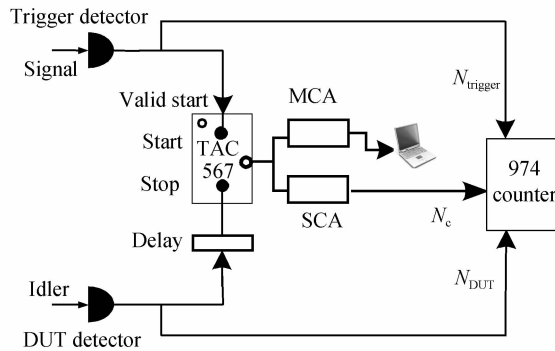


图 6 光子计数及符合探测示意图

Fig. 6 Schematic diagram of photon count and coincidence measurement

两路光子进入探测器后形成电脉冲, 把信号光 (685nm) 通道作为触发通道连接时间幅度转换器^[13] (Time-to-Amplitude Converter, 简称 TAC) 的“Start”端, 空闲光 (736 nm) 通道作为待定标通道经延迟器连接至 TAC 的“Stop”端, 通过多通道分析仪 (Multi-Channel Analyzer, 简称 MCA) 选取符合门宽, 再由单通道分析仪 (Single-Channel Analyzer, 简称 SCA) 输出甄别后的符合脉冲, 同时 TAC 通过校正输出有效触发脉冲, 再连接计数器得到符合计数值和有效触发计数值, 即可得到待定标通道的探测效率.

利用钛宝石激光器产生的 736 nm 单波长激光测量待定标通道晶体后的光学透过率、BBO 晶体的透过率, 结合实验测得的探测效率, 代入式 (5) 和式 (6), 即可得出两种模式下 APD 在 736 nm 波段的量子效率.

3 实验结果与分析

3.1 两种模式量子效率测量及不确定度分析

搭建共线和非共线定标装置后, 测量 APD 量子效率时, 两种模式共同的参量设置见表 1.

表 1 共线和非共线模式下测量参量设置

Table 1 Measurement parameters setting at collinear and nonlinear modes

Name	Laser-power	Coincidence delay	Accidental coincidence delay	Measuring time	Measurement times
Parameters	20 mW	63 ns	10 ns	100 s	10

非共线模式下调节两个通道 APD 的位置; 共线模式下调节触发端光纤耦合器和待定标端 APD 位置, 选取两路光子计数最大值. 测量转动半波片前后两个通道的光子计数, 计算两个通道信噪比. 设置待定标端延迟 63 ns, 通过 MCA 观察符合峰, 选取符合峰的全高宽为符合门宽, 通过 SCA 输出符合计数. 由于两个通道相关光子的光谱并不匹配, 需要调整待定标通道 APD 位置, 选取 SCA 输出的最大符合计数值. 采集 10 组符合计数以及有效触发计数, 每采集一组数据后, 改变延迟为 10 ns, 测量意外符合计数; 旋转半波片 45° 测量有效触发背景计数 (背景符合非常小可以忽略不计). 两种模式 10 次测量结果的平均值见表 2.

由表 2 数据可知共线模式的信噪比很低 (8 : 1). 这是因为泵浦光和相关光子出射方向接近, 通过级联滤光片可以消除一部分泵浦光, 但通过实验证明当泵浦光衰减到一定量级后, 再放置滤光片已经没有衰减效

果,造成最终的信噪比低于非共线模式(35 : 1).

表 2 两种模式下光子计数和符合计数测量值

Table 2 Photon count and coincidence count measurement at collinear and nonlinear modes

Name		Valid-trigger N_{VS}	Trigger background N_B	SNR	Coincidence count N_C	Accidental coincidence N_A
Phase matching modes	Nonlinear	1 779 012	50 125	35 : 1	804 584	4 114
	Collinear	2 357 437	288 801	8 : 1	513 541	17 987

利用钛宝石激光器产生的 736 nm 单波长激光和功率计测量 10 次非共线和共线模式晶体和晶体之后待标定通道的透过率均值见表 3. 对于非线性晶体 BBO 引入的光子数损耗来说,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,因此光子在 BBO 晶体内部的损失(透射率 T_{photon})可以通过晶体的总透射率 T 开根号得到,即

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

表 3 待标定通道 736 nm 波段透过率测量结果

Table 3 Transmittance data of calibrated channel at 736nm

Phase matching modes	Total transmittance of BBO/%	Total transmittance after BBO/%
Nonlinear	65.6	84.7
Collinear	79	40

由表 3 数据可知非共线和共线模式下通道的整体透过率分别为 68.6% 和 35.6%,再把表 2 数据代入式(5)和式(6)可得非共线模式下 APD 在 736 nm 波段的量子效率为

$$\eta_1 = \frac{N_C - N_A}{\tau_1 (N_{VS} - N_B)} = 67.5\% \quad (8)$$

共线模式下 APD 在 736 nm 波段的量子效率为

$$\eta_2 = \frac{N_C - N_A}{\tau_2 (N_{VS} - N_B)} = 67.2\% \quad (9)$$

测量结果的不确定度主要来源包括:

- 1) BBO 晶体透射率测量不确定度;
- 2) 待测通道 BBO 晶体之后透过率测量不确定度;
- 3) 待测通道探测效率测量不确定度.

这 3 项最终体现在 10 次测量结果的重复性中,为系统的 A 类不确定度项. 两种模式 736 nm 波长范围量子效率测量结果相对不确定度合成见表 4.

表 4 两种模式量子效率测量不确定度合成

Table 4 Combined standard uncertainty of quantum efficiency at collinear and nonlinear modes

Phase matching mode	Nonlinear		Collinear	
	Type	Uncertainty	Type	Uncertainty
Transmittance of BBO	A	0.3%	A	0.29%
Transmittance after BBO	A	0.2%	A	0.25%
Repeatability of detection efficiency	A	0.15%	A	0.6%
Combined uncertainty		0.39%		0.71%

表 4 中,共线模式下探测效率不确定度明显高于非共线模式,是由于探测效率是由符合计数、意外符合计数、触发计数和背景计数共同决定的,共线模式信噪比很低,泵浦光波动引起的背景计数变化对测量结果的影响很大,由表 2 数据可知,同等功率条件下,共线模式光子速率偏高,增加了意外符合概率,且由图 5 可知,待标定使用的透镜口径远大于触发端的光纤口径,同样造成待标定端光子速率偏大,意外符合概率增加,最终导致探测效率测量结果的不确定度相对偏高.

考虑共线模式下的相位失配和泵浦光是高斯光束,理论计算出所用晶体出射的信号光(685 nm)和空闲光(736 nm)的光谱带宽分别为 19 nm 和 22nm,并且越远离简并波长,光谱带宽越窄. 具体模拟结果见表 5.

表 5 不同相位匹配角下的光谱带宽

Table 5 The spectral bandwidth distribution under different phase matching conditions

Phase matching angle	Signal		Idler	
	Central length/nm	Band width/nm	Central length/nm	Band width/nm
28.8°	472.27	<1	1 429.7	8
32.16°	573.21	3	932.54	6
32.6°	603.21	3	862.74	7
33.1°	686.77	19	734.86	22

3.2 两种模式定标结果分析比对

由上面所测结果可知,共线和非共线两种模式测量 APD 在 736 nm 波段的量子效率分别为 67.2% 和 67.5%,其合成不确定度分别为 0.71% 和 0.39%,证明两种模式测量结果可靠性很高,且两者的相对偏差为

$$e = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\eta_1} = 0.4\% \quad (10)$$

两种模式测量结果的一致性可以用 E_n 值^[14]来描述,即

$$E_n = \frac{\eta_1 - \eta_2}{\sqrt{U_{\eta_1}^2 + U_{\eta_2}^2}} = 0.37 \quad (11)$$

式中 U_{η_1} 和 U_{η_2} ($k=1$) 分别是非共线和共线模式测量结果的合成扩展不确定度. 由式(11)知 E_n 值小于 1,为满意结果,说明两种模式都可以定标单光子探测器的量子效率,但两者各有优缺点. 根据上述实验和相关文献分别列出两种模式定标 APD 量子效率的优缺点为:

1)非共线相位匹配模式. 优点:相关光子和泵浦光出射方向在空间上是分离的,便于提高系统信噪比(本实验 35:1);已有文献证明 SPDC 过程产生的相关光子具有宽光谱圆环分布^[15-17],可以同时 APD 进行宽谱段定标. 缺点:由于相关光子是发散的,并且由于相位失配和高斯泵浦光束引起的相关光子出射角度扩展,增加了对出射方向几何定位的难度;对耦合透镜和 APD 摆放位置准确度要求极高(本实验需要把探测器 APD 放在高准确度三维调整架上,反复扫描得到最佳位置).

2)共线相位匹配模式. 优点:相关光子出射角度很窄,便于定位,方便 APD 位置的调节. 缺点:相关光子和泵浦光出射方向接近,而且比泵浦光数量低好几个量级,难以从泵浦光中分离,信噪比偏低(本实验 8:1);需要精确测量背景光子数量和意外符合数量,增加了测量难度;共线模式时,一个相位匹配角只能产生一对相关光子,且信号光和空闲光的光谱带宽很窄,本文是 19 nm 和 22 nm,并且越远离简并波长,带宽越窄,甚至小于 1 nm,因此不能同时进行宽谱段定标.

4 结论

本文在共线和非共线两种相位匹配模式下,对单光子探测器 APD 在 736 nm 波段进行了量子效率定标,得出两种测量结果的合成不确定度分别为 0.71% 和 0.39%,相对偏差为 0.4%, E_n 值小于 1. 证明两种模式的测量结果具有很高的可靠性和一致性,表明利用相关光子方法,在共线和非共线两种模式下都可以对 APD 进行量子效率定标,证明了相关光子定标原理的适用性. 比较了两种模式定标 APD 量子效率的优缺点,这为后续利用相关光子方法对遥感器进行辐射定标提供了晶体相位匹配模式选择依据. 文中还有一些问题需要解决,如提高连续泵浦条件下,共线模式装置的信噪比,降低意外符合概率,提高定标实验准确度,降低不确定度,等等,最终实现精确定标光子计数探测器的目标,把相关光子定标方法应用于航天领域.

参考文献

- [1] FOUKAL P V, KOCHLING H, MILLER P. Cryogenic absolute radiometer as laboratory irradiance standards, remote sensing detectors, and pyroheliometers[J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(7): 988-993.
- [2] 石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学[M]. 西安电子科技大学出版社, 2003: 118-119.
- [3] LI Xu, ZHU Zhen-he. Research of femtosecond pulse optical parametric process for nonlinear phase matching[J]. *Journal of the CUN(Natural Sciences Edition)*, 2005, **14**(4): 298-299.
李旭, 朱振和. 非共线相位匹配飞秒脉冲光参量过程的研究[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2005, **14**(4): 298-299.
- [4] 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): 1390-1404.

- [5] HONG C K, MANDEL L. Theory of parametric frequency down conversion of light[J]. *Physical Review A*, 1985, **31**(4): 2409-2418.
- [6] MIGDALL A. Absolute quantum efficiency measurements using correlated photons: toward a measurement protocol[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, **50**(2): 478-481.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] MIGDALL A, CASTELLETTO S, DEGIOVANNI I P, *et al.* Intercomparison of a correlated-photon-based method to measure detector quantum efficiency[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(15): 2916-2918.
- [10] 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. 光子计数器线性的测量和修正[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0604001.
- [11] 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.
- [12] DEVAUX F, LANTZ E. Spatial and temporal properties of parametric fluorescence around degeneracy in a type I LBO crystal[J]. *The European Physical Journal D*, 2000, **8**: 117-124.
- [13] KOSTAMOVAARA J, MYLLYLÄ R. A time-to-amplitude converter with constant fraction timing discriminators short time interval measurement[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1985, **A239**: 568-578.
- [14] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 第四版. 北京:中国质检出版社, 中国标准出版社, 2014: 254-255.
- [15] HARRIS S E, OSHMAN M K, BYER R L. Observation of tunable optical parametric fluorescence[J]. *Physical Review Letters*, 1967, **18**(18):732-734.
- [16] MIGDALL A L, DATLA R U, SERGIENKO A, *et al.* Absolute detector quantum-efficiency measurements using correlated photons[J]. *Metrologia*, 1995, **32**: 479-483.
- [17] LU Zong-gui, LIU Hong-jun, JING Feng, *et al.* Theoretical analysis of spectral properties of parametric fluorescence via spontaneous parametric downconversion[J]. *Acta Physics Sinica*, 2009, **58**(7): 4689-4696.
卢宗贵, 刘红军, 景峰, 等. 基于自发参量下转换产生参量荧光的光谱分布特性理论分析[J]. 物理学报, 2009, **58**(7): 4689-4696.