

基于相关光子的红外探测器测试技术研究

张鹏举 刘长明 刘红波 沈荣仁 史学舜 庄新港

Infrared detector testing technology based on correlated photons

ZHANG Pengju, LIU Changming, LIU Hongbo, SHEN Rongren, SHI Xueshun, ZHUANG Xingang

引用本文:

张鹏举, 刘长明, 刘红波, 等. 基于相关光子的红外探测器测试技术研究[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1284–1291. DOI: 10.5768/JAO202546.0612010

ZHANG Pengju, LIU Changming, LIU Hongbo, et al. Infrared detector testing technology based on correlated photons[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1284–1291. DOI: 10.5768/JAO202546.0612010

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于SiPM单光子探测器的荧光光谱仪研究

Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector

应用光学. 2022, 43(2): 278–283 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203001>

单光子激光主动探测信噪比数学建模与评估

Mathematical modeling and evaluation of signal-to-noise ratio for single-photon laser active detection

应用光学. 2025, 46(1): 194–201 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0107001>

一种微波光子探测器组件的封装设计与实现

Package design and realization of a microwave photon detector component

应用光学. 2020, 41(2): 400–404 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205004>

单光子探测三维点云与可见光图像融合处理算法研究

Fusion processing algorithm of single-photon detection for three-dimensional point cloud and visible light image

应用光学. 2021, 42(6): 1034–1039 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602004>

旋转物体的单光子三维重建技术

Single-photon 3D reconstruction technology of rotating objects

应用光学. 2024, 45(5): 879–884 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501001>

全国产化公里级单光子测距系统

Domestic kilometer-level single photon ranging system

应用光学. 2025, 46(3): 522–529 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1284-08

引用格式: 张鹏举, 刘长明, 刘红波, 等. 基于相关光子的红外探测器测试技术研究[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1284-1291.

ZHANG Pengju, LIU Changming, LIU Hongbo, et al. Infrared detector testing technology based on correlated photons[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1284-1291.



在线阅读

基于相关光子的红外探测器测试技术研究

张鹏举, 刘长明, 刘红波, 沈荣仁, 史学舜, 庄新港

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 国防科技工业光电子专业计量站, 山东 青岛 266500)

摘要: 随着红外和量子技术的发展, 红外波段的上转换单光子探测器具有高灵敏度、较快响应速度的特点使其得到较多的关注和研究, 但目前对其关键参数——探测效率的测试研究较少。利用周期极化钽酸锂晶体的自发参量下转换效应产生相关光子, 结合周期调谐和温度调谐实现了 $2.99\ \mu\text{m}$ ~ $5.01\ \mu\text{m}$ 的宽波段中红外相关光子输出; 搭建红外探测器探测效率测量装置, 利用探测效率修正模型实现探测效率的精确测量, 在 $3.39\ \mu\text{m}$ 波段红外探测器探测效率的合成标准不确定度为 2%。测量结果验证了该类探测器探测效率测试的可行性, 理论上该方法适用于其他波长。

关键词: 相关光子; 上转换单光子探测器; 红外; 探测效率

中图分类号: TN215; O431.2

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0612010

Infrared detector testing technology based on correlated photons

ZHANG Pengju, LIU Changming, LIU Hongbo, SHEN Rongren, SHI Xueshun, ZHUANG Xingang

(The 41st Institute of CETC, National Defence Opto-Electronic Primary

Metrology Laboratory, Qingdao 266500, China)

Abstract: With the development of infrared and quantum technologies, up-conversion single-photon detectors in the infrared band have attracted considerable attention and research due to the high sensitivity and fast response speed. However, research on measuring the key parameter, detection efficiency, is currently limited. Correlated photons were generated using the spontaneous parametric down-conversion effect of periodically poled lithium niobate crystals. By combining periodic tuning and temperature tuning, a wide-band mid-infrared correlated photon output ranging from $2.99\ \mu\text{m}$ to $5.01\ \mu\text{m}$ was achieved. The infrared detector detection efficiency measurement device was constructed, and the detection efficiency correction model was used to achieve accurate measurement of detection efficiency. The combined standard uncertainty for the detection efficiency of infrared detectors at the $3.39\ \mu\text{m}$ wavelength band is 2%. The measurement results confirm the feasibility of testing detection efficiency for this type of detector. Theoretically, this method is applicable to other wavelengths.

Key words: correlated photons; up-conversion single-photon detectors; infrared; detection efficiency

引言

根据光辐射相关理论, 温度高于绝对零度的物体均会向外发出红外辐射, 且特定的红外波段在大气中有较好的透过率, 因此红外波段在军用、民

用领域都发挥着巨大作用^[1-3]。红外波段的热辐射特性使红外技术广泛应用于非接触式的成像和测温, 如医疗诊断、工业检测、消防检测等; 红外波段的大气透过窗口特性使红外技术广泛应用于高空

收稿日期: 2025-09-12; 修回日期: 2025-11-11

第一作者: 张鹏举, E-mail: zhangpengju@ei41.com

遥感、红外制导、红外夜视等领域^[4-7]。

红外探测器经过多年的发展,从最初的以热电偶、热电堆、热辐射仪等为代表的热电探测器,到后续发展出以硒化铅、碲化铋、碲化铅为代表的传统红外探测器及以碲镉汞、量子阱为代表的新型红外探测器,再到以频率上转换、超导纳米线、超导转换边沿等为代表的单光子红外探测器^[8-10]。频率上转换单光子探测器以其较高的灵敏度和较快的响应速度优势得到快速发展^[11-15],但目前对该类探测器主要性能参数的研究较少,本研究针对该类探测器主要参数——探测效率进行测试,

可以为未来该类探测器的研制、生产、优化提供测试保障。

1 测量原理

待测的单光子探测器的探测效率采用相关光子法进行测试,利用非线性晶体的参量下转换效应产生两路相关光子,两路相关光子分别接入待测单光子探测器和触发单光子探测器,两路探测器信号接入时间相关单光子计数器中进行符合测量,最终得到待测单光子探测器的探测效率,测量原理如图1所示。

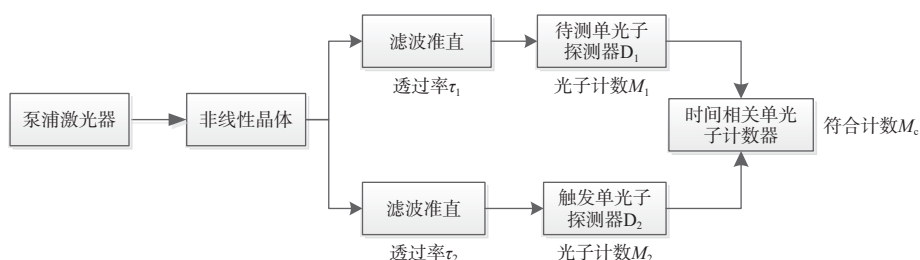


图1 相关光子法测量单光子探测器的原理

Fig. 1 Principle of correlated photon method for measuring single photon detectors

相关光子产生过程中满足能量守恒定律,则表明产生的两路相关光子数相同,都为 N 。

一路相关光子经过透率为 τ_1 的滤波准直光路进入待测单光子探测器,另一路相关光子经过透率为 τ_2 的滤波准直光路进入触发单光子探测器,利用时间相关单光子计数器测量得到的待测单光子探测器、触发单光子计数器的计数值分别为 M_1 和 M_2 ,双路符合计数值为 M_c 。假设待测单光子探测器、触发单光子计数器的探测效率分别为 η_1 、 η_2 ,则有:

$$M_1 = \eta_1 \times \tau_1 \times N \quad (1)$$

$$M_2 = \eta_2 \times \tau_2 \times N \quad (2)$$

时间相关单光子计数器通过记录两路信号之间的时间差计算双路符合计数值,只有两路信号的时间差在设定的范围内才会产生符合计数,则:

$$M_c = \eta_2 \times \tau_2 \times N \times \eta_1 \times \tau_1 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),则被测单光子探测器的探测效率 η_1 为

$$\eta_1 = \frac{1}{\tau_1} \frac{M_c}{M_2} \quad (4)$$

通过式(4)可知,待测单光子探测器的探测效率 η_1 的测量结果和触发单光子探测器的探测效率无关,是一种不需要标准探测器的绝对测量,和传

统的利用标准探测器进行测量的思路存在差别^[16]。

2 测量装置组成

测量装置主要由780 nm泵浦激光器、周期极化铌酸锂(periodically poled lithium niobate, PPLN)晶体、二向色镜、滤光片、透镜、时间相关单光子计数器等器件组成。780 nm激光经过PPLN晶体后产生了相关光子对,利用二向色镜将相关光子对分成3 μm ~5 μm 的中红外相关光子和924 nm~1 055 nm的近红外相关光子,近红外光子经滤波准直后进入触发单光子探测器,中红外光子经滤波准直后进入上转换单光子探测器,两路探测器的信号接入时间相关单光子计数器中进行符合测量,最终在3.39 μm 波段进行了探测器探测效率的测试。

2.1 非线性晶体

PPLN晶体的透光范围通常在0.4 μm ~5.5 μm 左右,具有较大的非线性系数、较高的损伤阈值、稳定的物理化学性质以及成熟的加工工艺等优点,因此常用于宽波段相关光子的产生。为实现相关光子的高效产生,通常利用准相位匹配技术提高晶体自发参量下转换过程中的转换效率^[17]。

晶体的自发参量下转换过程满足能量守恒和动量守恒^[18-19],而且为提高相关光子的收集效率,

晶体设计采用共线相位匹配方式,因此:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad (5)$$

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i - k_m = 2\pi \frac{n_p(\lambda_p)}{\lambda_p} - \frac{n_s(\lambda_s)}{\lambda_s} - \frac{n_i(\lambda_i)}{\lambda_i} - \frac{m}{\Lambda_0} = 0 \quad (6)$$

式中: Δk 为三波在传播过程中的波矢相位失配量; λ_j 、 k_j 、 n_j ($j=p, s, i$) 分别为泵浦光、中红外光子和近红外光子的波长、波矢及在晶体内的折射率; Λ_0 为 PPLN 晶体的周期; k_m 为周期极化晶体中的相位失配量。为实现最大转换效率,令 $m=1$, 即一阶准相位匹配的晶体周期可表示为

$$\Lambda_0 = 1 / \left[\frac{n_p(\lambda_p)}{\lambda_p} - \frac{n_s(\lambda_s)}{\lambda_s} - \frac{n_i(\lambda_i)}{\lambda_i} \right] \quad (7)$$

光在 PPLN 晶体中的折射率可由塞耳迈耶尔方程表示, 泵浦光为 e 偏振光时^[20], 其表达式为

$$n^2(\lambda, T) = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)^2} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2 \quad (8)$$

$$f = (T - T_0)(T + T_0 + 2 \times 273.16) = (T - 24.5)(T + 570.82) \quad (9)$$

式中: n 为光在非线性晶体中的折射率; λ 为光波长; T 为晶体的工作温度; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为常数。根据式(8)~(9)可以计算出泵浦光、信号光和空闲光在不同工作温度的晶体中的折射率。

根据泵浦光波长为 780.0 nm, 由式(5)~(9)可以得到在特定温度下, 中红外光子波长和晶体周期之间的关系, 利用 LabVIEW 编写程序模拟了在 20 °C、40 °C、60 °C、80 °C、120 °C 时, 二者的关系如图 2 所示。从模拟的曲线可得, 波长一定时, 随着温度的升高, 满足准相位匹配需要的晶体周期越小; 在晶体周期确定的情况下, 存在一个工作温度满足两个相位匹配条件的情况, 即周期确定的某块晶体, 工作在特定的温度时, 会产生两个不同波段的红外相关光子, 因此在后续测试过程中需要滤波光路过滤掉非测试波段以外的其他波段的相关光子。

通过上述的模拟可得, 实现 3 μm~5 μm 的相关光子输出, 单个周期的晶体无法通过调节工作温度满足宽光谱输出的要求, 需要多块不同周期的晶体组合, 因此用上述软件进一步模拟了在同一个周期下, 不同工作温度可以实现的波长范围, 结果如图 3 所示。其中横线表示 4 个不同的晶体周

期, 与曲线相交的部分代表晶体通过调节工作温度可以输出的光谱范围, 通过图 3 可得, 4 块不同周期的晶体可以满足 3 μm~5 μm 的相关光子输出。根据软件模拟结果, 项目最终选用了尺寸为 1 mm×2 mm×30 mm, 周期分别为 21.3 μm、21.0 μm、20.7 μm、20.4 μm 的 4 块 PPLN 晶体。将晶体依次排列固定在设计的温控炉中, 通过位移装置将不同周期的晶体切换进光路中, 调节温控炉的温度, 实现不同波长相关光子输出。

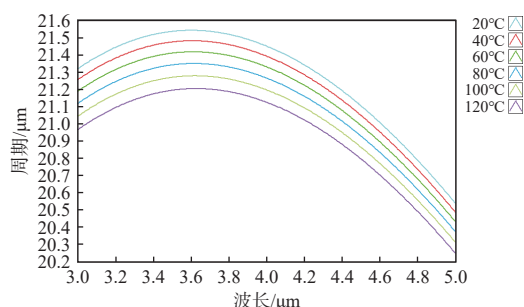


图 2 PPLN 晶体信号光波长和周期的关系图

Fig. 2 Relationship between wavelength of signal light and period of PPLN crystal

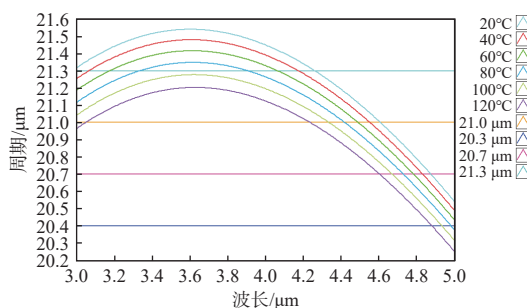


图 3 不同晶体周期在不同工作温度下的光谱范围图

Fig. 3 Spectral range of different crystal periods at different operating temperatures

2.2 测试装置

整个测试装置除了用于自发参量下转换的 PPLN 晶体外, 还包括泵浦激光器、激光稳功率器、起偏器、透镜、长通滤光片、窄带滤波器、二向色镜等多种器件。泵浦激光器为 780 nm 的窄线宽激光器, 其线宽为 11 kHz, 1 h 的功率不稳定性为 0.6%, 用于和非线性晶体作用产生相关光子。激光稳功率主要实现泵浦激光功率的稳定, 使激光功率不稳定性达到 0.07%, 减小输出相关光子的波动, 进而减小探测器探测效率的测量不确定度。起偏器主要保证泵浦光的偏振特性, 实现泵浦光在非线性晶体内的高效率转换。透镜主要实现光的准直和聚

焦, 保证泵浦光和晶体的耦合效果及将产生的两路相关光子耦合进探测器。长通滤光片主要用于过滤相关光子中残留的泵浦光, 以及泵浦光中残留的 1 560 nm 的种子光。因为相关光子的带宽较

宽, 窄带滤波器主要用于过滤相关光子中除测试波长外的其他杂散光。二向色镜主要用于分离产生的两路近红外光子和中红外光子, 用于后续的双路符合测量。整个装置的原理图如图 4 所示。

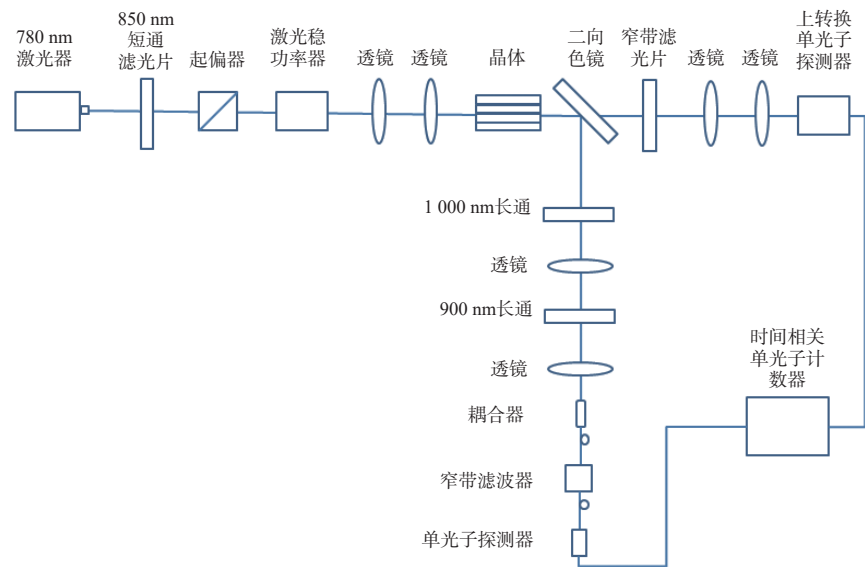


图 4 测试装置原理图

Fig. 4 Schematic of test device

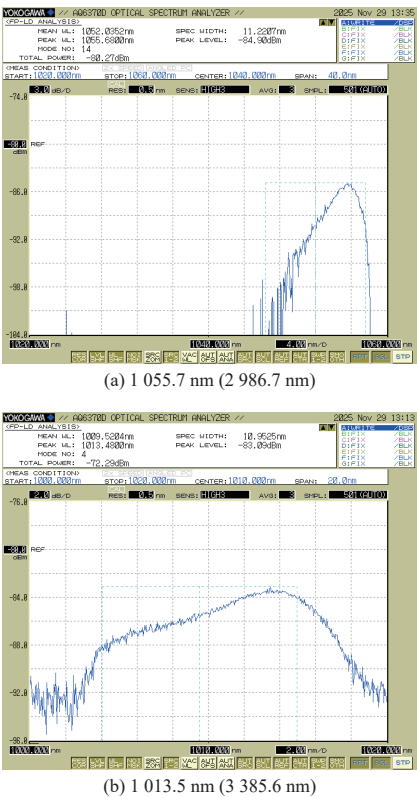
按照原理图搭建了上转换单光子探测器的测试装置, 上转换单光子探测器的工作波段为 3.39 μm , 单光子探测器采用的是 Si 单光子探测器, 工作波段为 1 013 nm, 两个探测器的输出计数信号接入时间相关单光子计数器, 两路信号进行符合测量, 得到符合计数和光信号计数。

所示, 括号内波长为近红外对应的另一路中红外波长, 即装置产生的中红外相关光子光谱范围为 2.99 μm ~5.01 μm 。

3 实验结果与分析

3.1 光谱范围测量

装置利用非线性晶体的自发参量下转换效应产生相关光子, 整个过程满足能量守恒定律。在泵浦光波长一定的情况下, 产生的两路相关光子波长具有一一对应关系, 即确定一路相关光子波长后, 另一路相关光子的波长也是确定的。装置利用 780.0 nm 激光和 PPLN 晶体产生一路波长为 924 nm~1 055 nm 的相关光子和一路波长为 3 μm ~5 μm 的相关光子。由于中红外波段的光功率很弱, 无法直接用光谱仪或波长计测量, 因此适当调高泵浦光功率, 利用光谱仪测量波长 924 nm~1 055 nm 近红外相关光子, 通过能量守恒可推算产生的中红外相关光子波长。具体测量的光谱范围如图 5



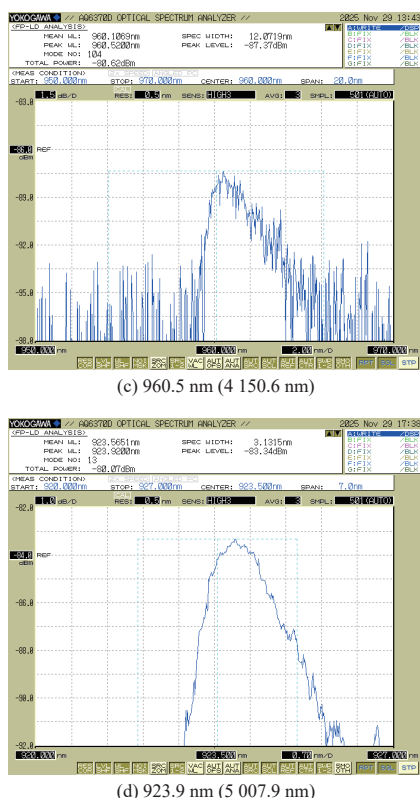


图5 光谱范围测量结果图

Fig. 5 Measurement results of spectral range

3.2 探测效率测量

进行上转换单光子探测器探测效率测量时,在近红外波段利用窄带滤波器保证近红外波段为 $1\,013\text{ nm}\pm 0.5\text{ nm}$,防止由于带宽过宽导致符合测量过程中出现大量意外符合,影响探测器探测效率测量的准确度。考虑上转换探测器存在的死时间、双光路长度不同等因素引起的符合丢失,探测

效率计算公式可以修正为^[21]

$$\eta = \frac{1}{\tau} \frac{N_C}{N_{VS}} \cdot \frac{1}{\alpha\gamma} \quad (10)$$

式中: N_C 为扣除意外符合计数的有效符合计数; N_{VS} 为扣除触发通道暗计数、背景噪声计数后的有效触发通道计数,这两个参数是通过软件符合测量得到的; τ 为整个中红外光路的透过率; α 为相关光子符合丢失校正因子; γ 为探测器死时间校正因子。

利用时间相关单光子计数器进行符合计数测量时,除了两路光子的真实符合计数外,还包括探测器暗计数、背景噪声和光子信号之间的意外符合计数,需要对意外符合计数进行扣除。具体的利用符合峰所在时间间隔 t 内的计数值减去符合峰附近相同时间间隔 t 内的计数值,扣除符合峰计数值中包含的意外符合计数。

项目利用 $3.39\text{ }\mu\text{m}$ 激光器和激光功率计对中红外光路的透过率进行测试,将 $3.39\text{ }\mu\text{m}$ 激光导入 PPLN 晶体中,使激光和 $3.39\text{ }\mu\text{m}$ 相关光子的光路相同,测量中红外光路前端和后端的激光功率分别为 5.231 mW 和 3.383 mW ,因此中红外光路的透过率为 $0.646\,7$ 。

相关光子符合丢失校正因子主要是对因双路符合测量过程中两路相关光子经过的光程差导致的符合丢失进行修正, $\alpha=1-N_{\text{DUT}}t_d$,其中 N_{DUT} 为红外探测器的计数率, t_d 为红外探测器的通道延时。利用时间相关单光子计数器测量红外探测器的通道延时为 12.09 ns ,测量结果如图6所示。

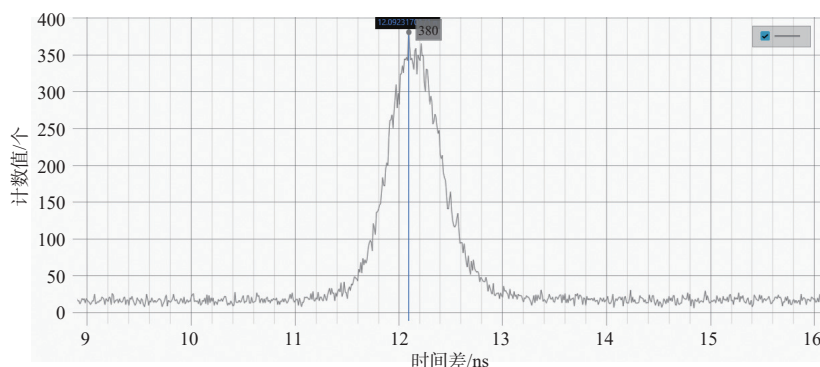


图6 红外探测器的通道延时测量结果图

Fig. 6 Measurement results of channel delay of infrared detector

探测器死时间校正因子是对因红外探测器死时间而造成的红外探测器计数损耗进行修正,

$\gamma=1-N_{\text{DUT}}t_b$,其中 N_{DUT} 为红外探测器的计数率, t_b 为红外探测器的死时间。利用时间相关单光子

计数器统计红外探测器非零计数对应的时间, 计算两个非零计数值之间的最小时间差, 测量得到的红外探测器的死时间为 19.44 ns。

将上述测得的中红外通道延迟、中红外探测器死时间等参数代入对应公式计算相关光子符合丢失校正因子、探测器死时间校正因子, 利用探测器探测效率修正公式测量得到探测效率测量结果如表 1 所示, 符合测量结果如图 7 所示。

表 1 探测器探测效率测量结果@3.39 μm

Table 1 Measurement results for detection efficiency of detector@3.39 μm

参数	测量结果
有效通道计数 N_{VS}	55 750 484
有效符合计数 N_C	450 714.5
符合丢失校正因子 α	0.996 39
死时间校正因子 γ	0.993 97
光路的损耗 τ	0.646 7
探测器探测效率 η	1.26%

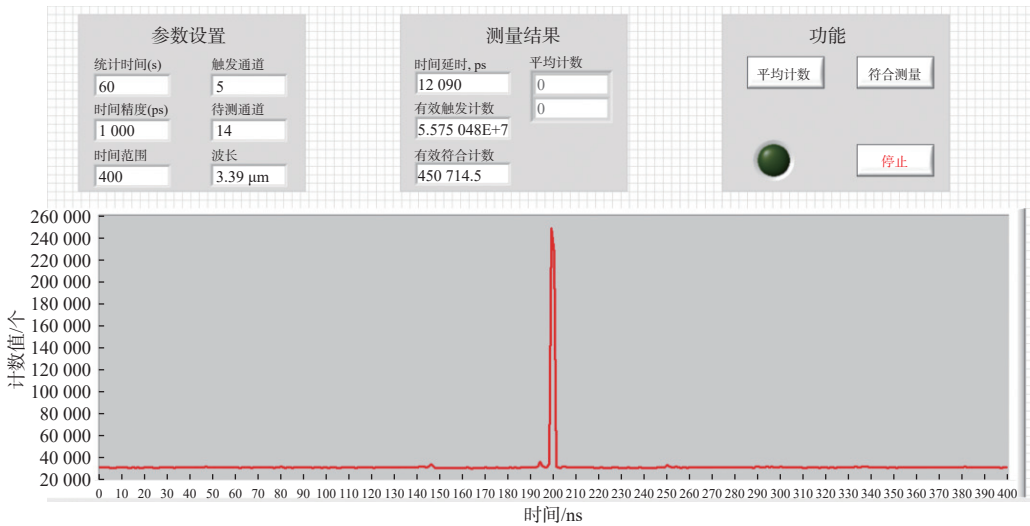


图 7 红外探测器符合测量结果图

Fig. 7 Measurement results of coincidence measurement of infrared detector

根据探测效率的数学模型式(10)分析, 探测效率的测量不确定度来源包括: 1) 有效符合计数测量; 2) 有效触发计数测量; 3) 中红外光路透过率测量; 4) 相关光子事件符合丢失校正因子测量; 5) 探测器死时间校正因子测量; 6) 探测器探测效率测量重复性等。其中有效符合计数测量和有效触发计数测量引入的测量不确定度主要由相关参数测量结果的重复性引起, 根据 6 次测试结果, 测量结果相对标准差分别为 1.14% 和 0.49%, 则引入的测量不确定度分量分别为 $1.41\%/\sqrt{6} = 0.51\%$ 和 $0.49\%/\sqrt{6} = 0.22\%$; 中红外光路透过率的测量引入的不确定度主要和采用功率计的测量不确定度、3.39 μm 激光器的功率不稳定性及测量重复性有关, 根据相关仪器的证书及说明书, 该分量引入的不确定度为 1.8%; 相关光子事件符合丢失校正因子测量引入的不确定度主要和红外探测器的计数值的测量、通道延迟的测量有关, 根据测量数学模型及测量结果, 该分量引入的

不确定度为 0.01%; 探测器死时间校正因子测量引入的测量不确定度主要和红外探测器计数值的测量和探测器死时间的测量有关, 根据测量数学模型及测量结果, 该分量引入的不确定度为 0.01%。最终红外探测器探测效率测量结果的不确定度如表 2 所示。

表 2 探测器探测效率测量不确定度

Table 2 Uncertainty for detection efficiency of detector

不确定度来源	评定方法	不确定度分量
有效符合计数	A	0.51%
有效触发计数	A	0.22%
光路透过率	B	1.80%
相关光子事件符合丢失校正	B	0.01%
探测器死时间校正	B	0.01%
测量重复性	A	0.63%
合成标准不确定度 u_c	—	2%

4 结 论

本文以 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 相关光子源作为测试光源, 利用双路符合测量在中红外波段实现对上转换单光子探测器探测效率的测量, 并对探测效率进行了测量不确定度评定。目前对中红外单光子探测器测试的研究较少, 本项目验证了利用相关光子法测量中红外单光子探测器探测效率的可行性, 为后续其他类似的研究提供借鉴。中红外上转换单光子探测器最终评定的合成标准不确定度达到 2%, 主要是由于中红外通道透过率测量引入的不确定度较大, 后续可以利用更稳定的中红外光源和不确定度更小的探测器对透过率进行测量, 进一步降低整体的测量不确定度。

文中所用上转换单光子探测器由于技术和设计问题, 采用了空间光、非线性晶体、光纤结合的设计, 整体光路耦合效率较低, 传输损耗较多, 且因为红外波段具有一定带宽, 导致上转换用的非线性晶体难以实现完美的相位匹配, 因此导致探测效率过低, 在实际应用方面存在障碍, 但其可以实现对极微弱中红外光探测的能力, 随着未来量子技术的发展, 探测效率的提高, 将得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] 姜会林, 付强, 段锦, 等. 红外偏振成像探测技术及应用研究[J]. 红外技术, 2014, 36(5): 345-349.
JIANG Huilin, FU Qiang, DUAN Jin, et al. Research on infrared polarization imaging detection technology and its application[J]. Infrared Technology, 2014, 36(5): 345-349.
- [2] 黄瑞娟. 红外光谱技术在食品检测中的应用[J]. 现代测量与实验室管理, 2015, 23(1): 9-14.
HUANG Ruijuan. Application of infrared spectroscopy in food detection[J]. Modern Measurement and Laboratory Management, 2015, 23(1): 9-14.
- [3] 陈胜哲, 陈彪. 红外技术在军事上的应用[J]. 光学技术, 2006, 32(S1): 581-583.
CHEN Shengzhe, CHEN Biao. Application of infrared technology in military affairs[J]. Optical Technology, 2006, 32(S1): 581-583.
- [4] 田国良, 柳钦火, 陈良富. 热红外遥感[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2014.
TIAN Guoliang, LIU Qinhuo, CHEN Liangfu. Thermal remote sensing[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [5] 罗海波, 史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2009(4): 565-573.
LUO Haibo, SHI Zelin. Development status and prospect of infrared imaging guidance technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009(4): 565-573.
- [6] 方迦南. 大视场中红外上转换成像技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2024.
FANG Jianan. Research on wide-field mid-infrared up-conversion imaging[D]. Shanghai: East China Normal University, 2024.
- [7] 乔亚. 红外成像制导对抗技术研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(12): 913-916.
QIAO Ya. Research on infrared imaging guidance countermeasure technology[J]. Laser and Infrared, 2005, 35(12): 913-916.
- [8] 郭旭, 刘鹏翔, 付俏俏, 等. 基于光学频率上转换的中红外探测研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(20): 202-219.
GUO Xu, LIU Pengxiang, FU Qiaoqiao, et al. Research progress of mid-infrared detection based on optical frequency upconversion[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2024, 61(20): 202-219.
- [9] 周茜. 基于非线性频率上转换的中红外波段少光子探测及成像[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
ZHOU Qian. Ultrasensitive mid-infrared up-conversion imaging at few-photon level[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [10] 马兴招, 唐利斌, 张玉平, 等. 硅基 BIB 红外探测器研究进展[J]. 红外技术, 2023, 45(1): 1-14.
MA Xingzhao, TANG Libin, ZHANG Yuping, et al. Research progress of silicon-based BIB infrared detector[J]. Infrared Technology, 2023, 45(1): 1-14.
- [11] WIDARSSON M, HENRIKSSON M, MUTTER P, et al. High resolution and sensitivity up-conversion mid-infrared photon-counting LIDAR[J]. Applied Optics, 2020, 59(8): 2365-2369.
- [12] JIANG S H, HUANG K, YU T T, et al. High-resolution mid-infrared single-photon upconversion ranging[J]. Photonics Research, 2024, 12(6): 1294-1302.
- [13] HUANG K, WANG Y Q, FANG J N, et al. Mid-infrared photon counting and resolving via efficient frequency up-conversion[J]. Photonics Research, 2021, 9(2): 259-265.
- [14] TANG R K, WU W J, LI X J, et al. Two-dimensional infrared and mid-infrared imaging by single-photon fre-

- quency upconversion[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(14): 1126-1131.
- [15] TIDEMAND-LICHTENBERG P, DAM J S, ANDERSEN H V, et al. Mid-infrared upconversion spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(11): D28-D35.
- [16] 张鹏举, 庄新港, 刘长明, 等. 基于相关光子对的单光子探测器量子效率校准技术研究[J]. *宇航计测技术*, 2023, 43(5): 57-62.
- ZHANG Pengju, ZHUANG Xingang, LIU Changming, et al. Research on quantum efficiency calibration technology of single photon detector based on correlated photon pairs[J]. *Aerospace Measurement Technology*, 2023, 43(5): 57-62.
- [17] 夏茂鹏. 基于参量下转换的中长波红外绝对辐射定标研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- XIA Maopeng. Research on absolute radiometric calibration of mid-long waves infrared based on parametric downconversion[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [18] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- YAO Jianquan. Nonlinear optical frequency conversion and laser tuning technology[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [19] 李雪, 延凤平, 谭思宇. 基于 PPLN 晶体的可调谐太赫兹波辐射特性研究[J]. *光电子·激光*, 2013(12): 2265-2269.
- LI Xue, YAN Fengping, TAN Siyu. Study on radiation characteristics of tunable terahertz wave based on PPLN crystal[J]. *Optoelectronics and Lasers*, 2013(12): 2265-2269.
- [20] JUNDT D H. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_{sub} [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(20): 1553-1555.
- [21] 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(5): 1005-1012.
- LYU Liang, LIN Yandong. Realization and correction of correlated photon coincidence counting[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011(5): 1005-1012.