

doi:10.3788/gzxb20174611.1112003

# 碲镉汞模拟探测器量子效率定标方法

盛文阳<sup>1,2</sup>, 李健军<sup>1</sup>, 夏茂鹏<sup>1</sup>, 郑小兵<sup>1</sup>

(1 中国科学院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:**为测量红外模拟探测器量子效率, 搭建了基于参量下转换效应的测量系统. 利用光学参量振荡器调谐输出的 2 576.5 nm 波长连续激光束作为泵浦源, ZnGeP<sub>2</sub> 晶体作为非线性晶体, 获取了 3.42 μm 和 10.4 μm 的相关光子对. 实验中通过将采集到的两个通道的光电流/电压信号转换为等效光子计数, 并利用两光路平衡测量的方法对每个模式的平均光子计数进行校正, 实现了碲镉汞红外模拟探测器在 10.4 μm 处的绝对功率响应度定标, 得到了相对合成不确定度优于 4.53% 的定标结果.

**关键词:**遥感; 参量下转换; 相关光子; 模拟探测器; 量子效率定标

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1112003-7

## Research on the Calibration Method of MCT Analogy Detector Quantum Efficiency

SHENG Wen-yang<sup>1,2</sup>, LI Jian-jun<sup>1</sup>, XIA Mao-peng<sup>1</sup>, ZHENG Xiao-bing<sup>1</sup>

(1 Remote Sensing Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, HeFei, Anhui 230026, China)

**Abstract:** The measurement facility based on parametric down-conversion technique is established to measure the quantum efficiency of the infrared analogy detector. Uses the CW laser beam of 2 576.5 nm wavelength tuning out of Optical Parametric Oscillator (OPO) laser as the pump source and the ZnGeP<sub>2</sub> crystal as the nonlinear crystal, obtained the correlated photon pairs of 3.42 μm and 10.4 μm. The charge amount of the collected photo-current/voltage signal is converted into the equivalent photon counting, and the dual channel data fluctuation is carried out for the average photon counting of each mode through the method of double light path balance measurement, realized the absolute power responsivity calibrated of an MCT infrared detector at 10.4 μm, the results show a relative combination uncertainty of about better than 4.53% for this calibration method.

**Key words:** Remote sensing; Parametric down-conversion; Correlation photons; Analog calibration; Quantum efficiency calibration

**OCIS Codes:** 120.0120; 040.5160; 270.5570

## 0 引言

光学遥感的定标较为成熟的两种方法分别是基于标准辐射源和基于标准传递探测器定标方法<sup>[1-2]</sup>, 两者的共同局限性都在于定标精度受限于溯源辐射基准及标准传递链路, 各环节引入的累计误差导致工程可复现性差和定标精度难以提高. 理论上如果能够减少或消除辐射基准以及标准传递链路各环节所引入的累

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (No. 2015AA123702) 和中国科学院创新基金项目资助

**第一作者:** 盛文阳 (1991—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光学传感器高精度定标. Email: wenyang\_sheng@126.com

**导师 (通讯作者):** 郑小兵 (1969—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学、辐射定标. Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2017-05-04; **录用日期:** 2017-06-21

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

计误差,仅利用客观物理效应能够实现更高的精度定标工作.基于非线性光学晶体的参量下转换(Spontaneous Parametric Down-conversion, SPDC)的定标方法,根据下转换产生的纠缠光源<sup>[3-5]</sup>可以在任何时间和空间准确呈现及无需依赖某个标准器或某种传递过程的特征,能够实现模拟探测器量子效率的“自身绝对”和“无溯源性”的定标<sup>[6]</sup>.

在光子计数型探测器量子效率定标中,较为普遍的方法是根据相关光子的时间相关性,利用符合测量的方法进行定标<sup>[7-9]</sup>.然而,目前光电测量和遥感定标中应用较多的是模拟探测器,如果探测器输出的是光电流信号或者电压信号,由于探测器接收的光通量范围大约为  $10^{-12} \sim 10^{-6}$  W,对应的光子速率为  $10^8 \sim 10^{14}$  个/s,则无法再利用符合测量的方法进行定标<sup>[10]</sup>.根据光子计数探测器的探测原理,为了实现对模拟探测器的量子效率定标,需要将双通道采集的电流/电压信号等效为光子计数模式.实验过程中通过在待定标光路中插入衰减片的方式来实现双光路的平衡探测.将每一个通道的一个模式的等效平均光子数作为基准,并且对两路等效光子计数进行等比例缩放,从而实现对模拟探测器量子效率的定标.

本文通过参量下转换的过程产生的是一对红外相关光子,两通道末端的采集探测器都是模拟型探测器,其中待定标碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)探测器为光伏型探测器,进一步拓宽了待定标探测器的类型,对实现空间遥感器拓宽到红外模拟探测器的高精度定标具有重大意义.

## 1 定标原理

### 1.1 双通道平衡探测

当探测器的探测面积大于相干区域面积时,每一个相干区域代表一种模式<sup>[7]</sup>,则探测区域包含的模式个数为

$$u_{\text{spatial}} = A_{\text{det},j} / A_{\text{coh},j} \quad (j = s, i) \quad (1)$$

式中,  $A_{\text{det},j}$  ( $j = s, i$ ) 分别表示信号光通道和空闲光通道探测器的探测面积,  $A_{\text{coh},j}$  表示相干面积,实验中认为泵浦光光斑面积为相干面积,则其相干面积表达式为

$$A_{\text{coh}} = A_{\text{pump}} \quad (2)$$

由文献[11]可知,当探测器的探测时间远大于 100 fs 的相关时间时,在探测时间内会存在许多相关过程,记  $u_{\text{tot}} = u_i u_{\text{spatial}}$  为探测器探测到所有模式的个数,则探测器探测到的光子数  $\langle N_j \rangle$  记为

$$\langle N_j \rangle = u_{\text{tot}} \eta_j u \quad (j = s, i) \quad (3)$$

式中,  $u$  表示每一个模式泊松分布均值.记  $n$  个独立同泊松分布和的方差为

$$\langle \delta^2 N_j \rangle = u_{\text{tot}} \eta_j u (1 + \eta_j u) \quad (4)$$

则两路探测器同时探测参量下转换光子数的协方差为

$$\langle \delta N_s \delta N_i \rangle = u_{\text{tot}} \eta_s \eta_i u (1 + \eta_i u) \quad (5)$$

联立式(3)、(4)、(5)得到模拟探测器量子效率与噪声衰减因子的关系为

$$\sigma_\alpha = \frac{\langle \delta^2 (N_s - \alpha N_i) \rangle}{2 \langle N_s \rangle} = \frac{1}{2} (1 + \alpha) - \eta_s \quad (6)$$

式中  $\sigma_\alpha$  表示噪声衰减因子,  $N_j$  ( $j = s, i$ ) 分别表示信号光和空闲光两个通道的等效光子计数,  $\alpha = N_s / N_i = \eta_s / \eta_i$ , 记  $\langle \delta^2 (N_s - \alpha N_i) \rangle$  为两路光子计数差值的方差,则模拟探测器的量子效率可以通过测量噪声衰减因子和两探测器量子效率的比值获得.由文献[12]可知,两路平均光子计数的比值等于两路输出光电流或电压的比值,模拟信号中为了获取平均光子计数,将输出的光电流一个电子电量等效为一个光子计数,即认为等效光子计数正比于采集时间内包含的电荷量,则由光电流信号转换的等效光子计数表示为

$$N_j = I_j \cdot \tau / e \quad (j = s, i) \quad (7)$$

式中,  $I_j$  ( $j = s, i$ ) 表示的是信号光和空闲光输出的光电流信号,  $e$  表示一个电子包含的电量,  $\tau$  表示采集器采集一个数据包含的时间.

将式(7)代入式(6),得到模探测器的量子效率定标表达式

$$\sigma_\alpha = \langle \delta^2 [(I_s \cdot \tau) / e - \alpha (I_i \cdot \tau) / e] \rangle / 2 \langle (I_s \cdot \tau) / e \rangle = \frac{1}{2} (1 + \alpha) - \eta_s \quad (8)$$

由于  $\sigma_\alpha \geq 0$ , 对式(8)分析可知

$$\eta_s \leq (1 + \alpha)/2 \quad (9)$$

对于两路非平衡探测( $\alpha < 0.1$ ),可采取待定标光路中插入衰减片的方法,来满足两通道为平衡探测的定标要求,且要满足

$$0.6 \leq \alpha \leq 1 \quad (10)$$

由文献[12]可知,平均光子计数的比值等于输出光电流的比值,由于待定标的模拟探测器为光伏型,只能输入电压值,所以计算时只要将光电压信号除以  $1\Omega$  即可,这种处理方式只是为完成两路信号模式右电流模式转化为光子计数模式,对量子效率定标没有影响.

## 1.2 双通道的等效光子数等比例缩放

实验中通过将双通道的等效光子数进行等比例缩小的方式来解决模拟探测器定标的局限性,以此来满足定标要求<sup>[13]</sup>.

将式(6)的 $\langle \delta^2(N_s - \alpha N_i) \rangle / 2\langle N_s \rangle$ 项进行展开,得

$$\langle \delta^2 N_s \rangle / \langle N_s \rangle - 1 = \eta_s u \quad (11)$$

令  $\eta_s u = \langle m_s \rangle$  表示信号光通道每个模式的平均光子数.由式(11)可知,需将光子数波动限制小于  $\langle m_s \rangle$  才能完成对模拟探测器量子效率定标.以式(11)为准则,通过寻找最佳缩小倍数将等效光子计数进行缩小,最后将缩小后的等效光子计数代入式(6),来完成对模拟探测器量子效率的定标工作.

实现 MCT 模拟探测量子效率定标数据处理流程见图 1.

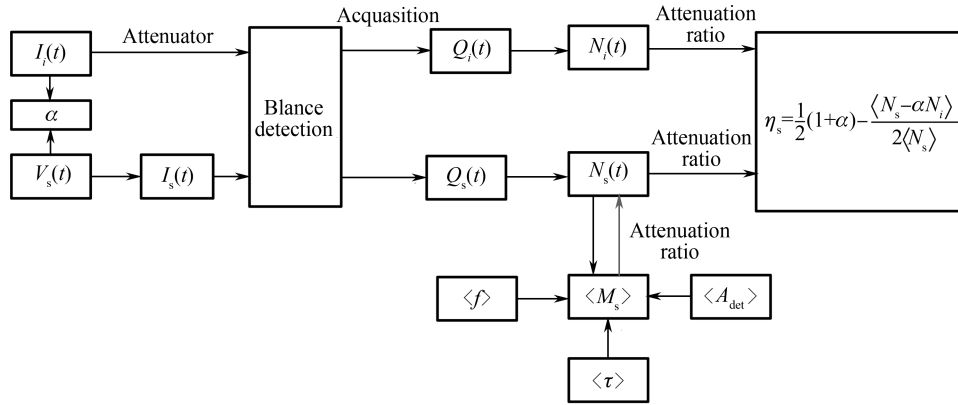


图 1 MCT 模拟探测量子效率定标数据处理过程

Fig.1 The data processing flow diagram of quantum efficiency calibration of MCT analog detector

## 2 实验装置

根据物理模型建立的实验装置见图 2.实验装置分为准直泵浦光源入射非线性晶体部分、相关光子对产生部分以及两通道信号探测三部分.

第一部分是准直泵浦光源入射非线性晶体中的部分.选择 OPO 激光器(OS 4500-HP+)输出  $2\ 576.5\ \text{nm}$  的窄线宽激光束作为泵浦光源.泵浦光束经小孔光阑、半波片、二向色镜准直入射非线性晶体内.两个小孔光阑起准直泵浦光光束以及消除光束非高斯成分作用, $2\ 576.5\ \text{nm}$  半波片用于通过关闭 SPDC 过程来探测背景噪声信号.由于 OPO 激光器能够实现信号光  $1.38 \sim 2\ \mu\text{m}$  和空闲光  $2.28 \sim 4.67\ \mu\text{m}$  的相关输出,实验中通过调节 OPO 激光器内部的晶体温度和周期,选择输出波长为  $2\ 576.5\ \text{nm}$ ,根据能量守恒和动量守恒,与其相关的 OPO 激光器输出的信号光波长为  $1\ 813\ \text{nm}$ ,实验中在此相关光路放置波长计(Bristol 621MIR)对输出波长进行实时监测,以此保证了泵浦光输入的波长稳定性.

第二部分为相关光子对产生部分,主要包括自发参量下转换以及信号光准直入射探测器的过程.非线性晶体选择的是  $\text{ZnGeP}_2$  晶体.泵浦光在  $\text{ZnGeP}_2$  晶体内部发生耦合效应,即自发参量下转换的过程.经由晶体后端面出射的光束包含有残余的泵浦光、 $3.42\ \mu\text{m}$  空闲光束和  $10.4\ \mu\text{m}$  的信号光束.实验中采用的是外部斩波模式,即是将斩波器放置在晶体后端,将相关光子信号先斩波再分束.采用这种方式的原因是,将外部斩波和 TXR 内部斩波的信号接入示波器中.通过对比验证发现采用外部方式的斩波频率更稳定,所以实验中采用外部斩波方式.

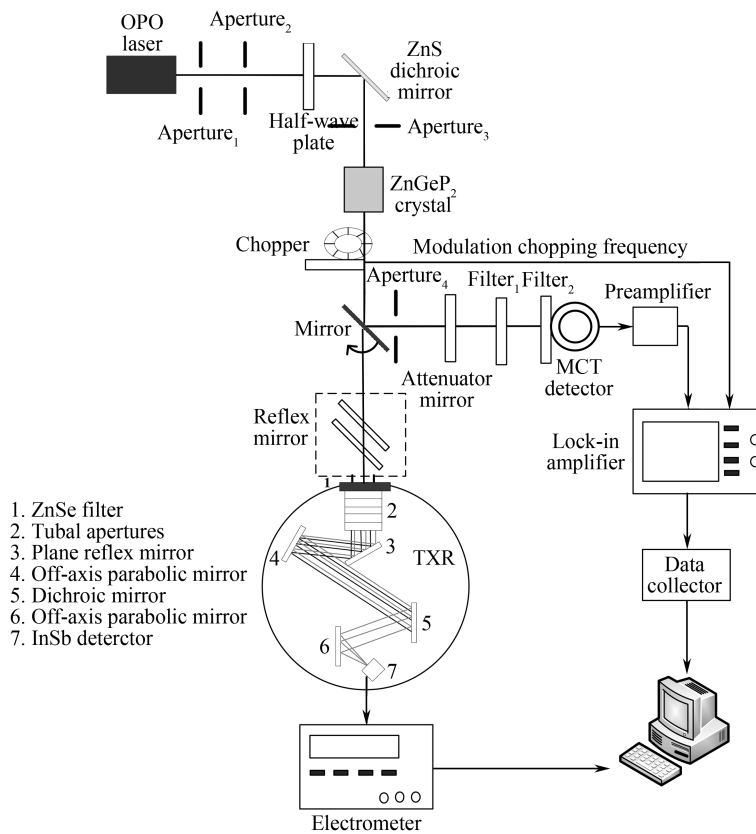


图2 MCT 红外探测器量子效率定标装置

Fig.2 The Schematic diagram of quantum efficiency calibration device for MCT infrared detector

第三部分为两通道信号的探测部分.其中,  $3.42 \mu\text{m}$  光路探测部分: 高低反射镜的功能是调整入射至 TXR 的激光光束的高度, 保证了产生的相关光束与 TXR 窗口具有相同的垂直高度, 且能够入射到 TXR 的中心位置. 光束经由 TXR 内部的管状光阑以及一系列的反射, 以及二向色镜的消除杂散光的过程, 确保到达 InSb 探测器的光束仅为  $3.42 \mu\text{m}$ .  $10.4 \mu\text{m}$  光路探测部分: 将斩波器后的反射镜  $45^\circ$  放置, 光束再经过光阑、衰减片 ( $\text{OD}=1$ )、 $10 \mu\text{m}$  窄带滤光片 (2 片) 后, 入射 MCT 探测器, 由 MCT 探测器接收响应.

### 3 实验结果

#### 3.1 电子学增益测试

为了探测  $10.4 \mu\text{m}$  输出的信号, 系统采用斩波器加锁相放大器结构, 其探测的输出信号经过放大器和锁相放大器进行增益放大. 为了满足多模式相关理论的信号处理要求, 必须要扣除系统的电子学增益部分, 才能获取 MCT 探测器输出的原始信号. 利用信号发生器产生一组不同幅度的方波信号, 在相同频率下, 测量数据采集卡的输出信号, 通过线性拟合的方式获取数据采集卡的信号值与原始信号的关系, 利用此线性关系可以获取定标过程中 MCT 输出的原始信号. 测试路线见图 3.

信号发生器输出频率为  $79 \text{ HZ}$ , 幅度从  $500 \sim 745 \text{ mV}$  变化的一组信号, 利用采集卡采集锁相放大器的输出信号, 两者的关系如图 4 所示.

根据图 4 的线性拟合关系, 可以获取电子学增益

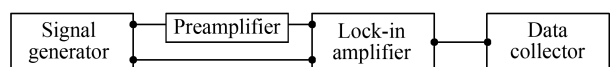


图3 探测器增益测试路线

Fig.3 The test measure of detector gain

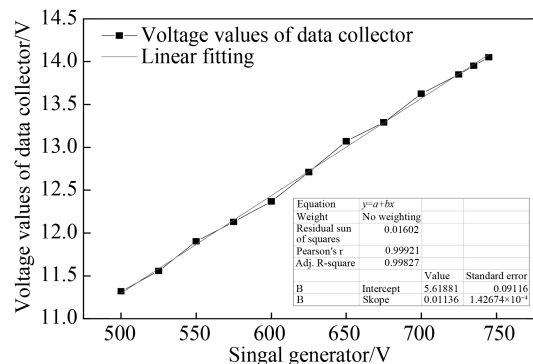


图4 探测器增益测试结果

Fig.4 The test result of detector gain

斜率,根据拟合曲线,可以获取自发参量下转换的 MCT 输出的真实信号值.

### 3.2 两路数据测量结果

为了实现对信号光路信号的测量,采用 TXR 内部的 InSb 探测器采集  $3.42 \mu\text{m}$  的光电流信号.产生的相关光子光束透过 ZnSe 窗口进入红外探测和测量系统,经过由一个  $\Phi 20 \text{ mm}$  的孔径光阑和四片消杂光光阑组成的管状光阑组后到达镀金平面镜,经平面镜反射后的光束再由主离轴抛物镜反射会聚,经过二向色镜分光,将  $3.42 \mu\text{m}$  和  $10.4 \mu\text{m}$  的光束分开,只收集  $3.42 \mu\text{m}$  的光束,并对其进行斩波和探测.经过二向色镜反射的  $3.42 \mu\text{m}$  的光束在到达镀金次离轴抛物镜之前经过两片消杂光光阑,会聚在一个孔径为  $\Phi 7.3 \text{ mm}$  的视场光阑处,从而形成一个孔径  $\Phi 20 \text{ mm}$  发散角  $\pm 1^\circ$  的测量光束.光束到达次离轴抛物镜会发生反射,反射至 InSb 探测器上.光束到达探测器光敏面的光斑尺寸为  $\Phi 2 \text{ mm}$ ,InSb 探测器光敏面尺寸  $\Phi 4 \text{ mm}$ ,满足光斑面积小于探测器光敏面的实验要求.

如图 2 所示,将晶体产生的相关光束经过斩波器后的反射镜折返,利用 MCT 探测器接受信号然后经过数据采集器采集  $10.4 \mu\text{m}$  信号.折返后的光束包括泵浦光, $3.42 \mu\text{m}$  信号光和  $10.4 \mu\text{m}$  的空闲光,此时需要对  $10.4 \mu\text{m}$  的光束进行提取,在光束到达 MCT 探测器前,利用小孔光阑、衰减片、两片  $10.4 \mu\text{m}$  干涉滤光片对产生的空闲光进行提取探测.MCT 将探测的光束经过放大器、锁相放大器后数据利用数据采集卡采集.

利用静电计获取 TXR 探测的  $3.42 \mu\text{m}$  光路的光电流信号以及利用采集器采集  $10.4 \mu\text{m}$  的电压信号.设置斩波器的斩波频率为  $79 \text{ Hz}$ ,则两通道采集的光电流信号和电压信号如图 5 所示.

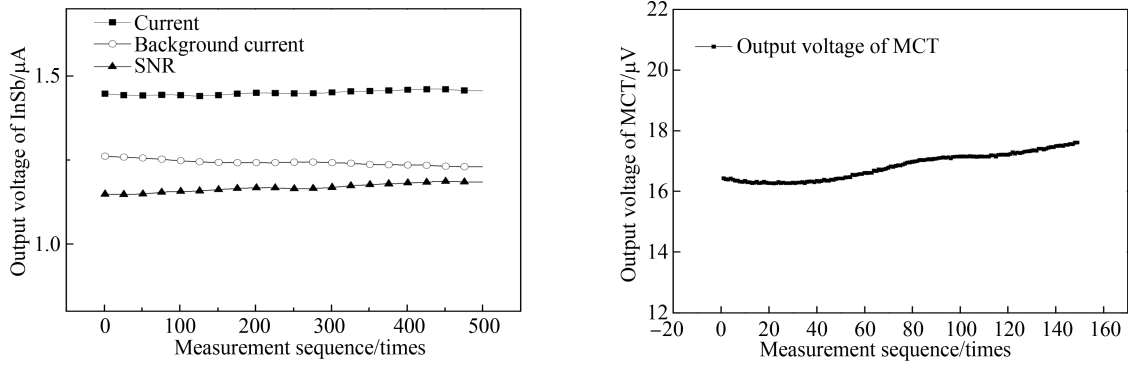


图 5 两通道采集的光电流信号和电压信号

Fig.5 Photo-current signals and voltage signals collected by two channels

在  $\text{ZnGeP}_2$  晶体中,自发参量下转换输出的相关光子和泵浦光基本共线,所以计算时以泵浦光的光斑大小作为相关光子的光斑大小.根据  $\lambda_p = 2576.5 \text{ nm}$  可得相关区域的面积  $A_{\text{coh}} = 32.374 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ ,根据参考文献<sup>[12]</sup>设相关时间为  $100 \text{ fs}$ ,采用相关光子和相关时间的关系可得等效光子计数为  $\langle N_s \rangle \geq 1.0516 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ,结合上述数值和联立式(1)、(2)、(3)可得信号光通道一个模式的平均光子数  $\langle m_s \rangle$  为

$$\langle m_s \rangle = 1.2499 \quad (12)$$

根据式(12),并将缩小倍数代入图 5 数据中,获得等比例缩小后的双通道的等效光子计数如图 6 所示.

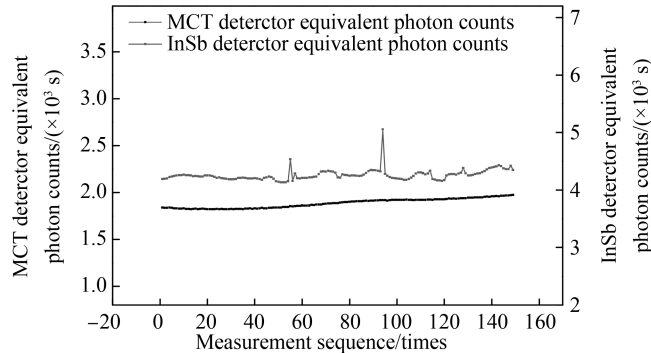


图 6 等比例缩小后的双通道的等效光子计数

Fig.6 Equivalent photon counting of two channels after equal proportion reducing

将图 6 中数据代入式(12)可得信号光通道的量子效率为

$$\eta_s = 0.0892 \quad (13)$$

## 4 结果讨论

### 4.1 不确定度分析

由不确定度传递定律<sup>[14]</sup>可知, MCT 红外模拟探测器的量子效率定标不确定度可由各不确定度因素平方和的平方根表示为

$$U(\eta_s(\lambda_s)) = \sqrt{U^2(q_i) + U^2(q_s) + U^2(f_{cc}) + U^2(f_{ac}) + U^2(\tau_2)} \quad (14)$$

式中,  $U(q_i)$  是空闲光通道的电荷不确定度;  $U(q_s)$  是信号光通道的电荷不确定度;  $U(f_{cc})$  是电流波动的互相关函数的不确定度;  $U(f_{ac})$  是电流波动的自相关函数的不确定度;  $U(\tau_2)$  是信号光通道的透过率测量的不确定度.

$$U(\tau_2) = \sqrt{U^2(\tau_f) + U^2(\tau_d) + U^2(\tau_r)} \quad (15)$$

式中,  $U(\tau_f)$  是 10.4  $\mu\text{m}$  干涉滤光片透过率不确定度;  $U(\tau_d)$  是反射镜的透过率不确定度;  $U(\tau_r)$  是红外衰减片透过率的不确定度, 其计算的各项不确定度见表 1.

表 1 不确定度成分及贡献

Table 1 Uncertainties components and contributions

Uncertainties component		Value	Relative uncertainties ( $k=1$ )
The average photon counting of each mode of signal channel	Flare area	—	0.003
	InSb photo-current	—	0.025 7
	Correlation time	—	0.01
Signal quantum efficiency calibration	MCT photo-voltage	—	0.025 7
	InSb photo-current	—	0.022 1
10.4 $\mu\text{m}$ Interference filter transmittance		0.5	0.005
Attenuator mirror		0.002 75	0.002
Reflex mirror transmittance		0.958 45	0.002
Combined uncertainties		—	0.045 3

由表 1 可知, 系统的主要不确定度来源是测量两路的光电流和光电压时引起的, 导致合成不确定度升高. 而信号光的不确定度主要是泵浦光的波动引起的, 后期会在将光路中加入功率稳定器控制泵浦光的波动, 以此来降低泵浦光的不确定度, 从而提高对红外探测器的定标精度.

### 4.2 结果

根据参量下转换定标原理, 需要通过评价待定标光路的所有损耗, 来提高模拟探测器量子效率的定标精度, 其整个通道的量子效率可以表示为

$$\eta_s = \tau_f \tau_a \tau_r \eta_{rs} \quad (16)$$

式中,  $\tau_f$  表示 10.4  $\mu\text{m}$  窄带滤光片的透过率,  $\tau_a$  表示红外衰减片的透过率,  $\tau_r$  表示镀银反射镜的透过率,  $\eta_{rs}$  表示 MCT 探测器的量子效率.

根据式(13)和式(16)数据可得 MCT 探测器的“量子效率”为

$$\eta_{rs} = 135.40 \quad (17)$$

扣除通道中光学元件的损耗, 得到功率响应度与量子效率的关系<sup>[15]</sup>

$$\eta = R \cdot 1\ 239.5/\lambda \quad (18)$$

式中,  $R$  的单位伏/瓦特,  $\lambda$  的单位为纳米, 将式(17)代入式(18)中并转化 MCT 响应单位, 可得 MCT 探测器的绝对功率响应度为  $R_v = 1\ 158.25\ \text{V/W}$ .

## 5 结论

实验基于参量下转换相关光子的方法, 通过将采集到的电流信号值和电压信号值转换为等效光子计数的方式, 并利用双光路平衡探测技术, 将所测得的每一个模式的平均光子计数进行双通道数据波动校正, 最终实现了红外 MCT 模拟探测器在 10.4  $\mu\text{m}$  功率响应度的绝对定标, 得到了相对合成不确定度为 4.53% 的

定标结果.实验验证了基于相关光子方法应用多模式相关性理论开展模拟探测器的定标方法的可行性,对于探索基于参量下转换的定标技术和发展模拟探测器辐射定标应用领域具有重要意义.

#### 参考文献

- [1] ZHENG Xiao-bing, WU Hao-yu, ZHANG Jun-ping, *et al.* High accuracy primary and transfer standards for radiometric calibration[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(21): 2009-2013.
- [2] ZHENG Xiao-bing, WU Hao-yu, ZHANG Jun-ping, *et al.* Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035%[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 749-752.  
郑小兵,吴浩宇,章骏平,等. 不确定度<0.03%的高精度光谱辐射功率标准[J]. 光学学报,2001,**21**(6):749-752.
- [3] BRIDA G, CASTELLETTO S, NOVOVERO C, *et al.* Quantum-efficiency measurements of photodetectors by means of correlated photons[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, **16**: 1623-1627.
- [4] LI Jian-jun, ZHENG Xiao-bing, LU Yun-Jun, *et al.* Quantum efficiency calibration of opto-electronic detector by means of correlated photons method[J]. *Chinese Optics Letter*, 2008, **6**(7): 472-475.
- [5] LU Liang, ZHANG Yin-chao, LIN Yan-dong, *et al.* Research on absolute calibration of photodetector quantum-efficiency using entangled photons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112004.  
吕亮,张寅超,林延东,等. 纠缠光子法绝对定标光电探测器量子效率的研究[J]. 光学学报,2012,**32**(1):0112004.
- [6] ODATE S, YOSHIZAWA A, FUKUDA D, *et al.* Quantum efficiency measurements by bidirectional coincidence counting of correlated photob pairs[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(21): 3176-3178.
- [7] BRIDA G, DEGIOVANNI I P, GENOVESE M, *et al.* Detection of multimode spatial correlation in PDC and application to the absolute calibration of a CCD camera[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(20): 20572-3238.
- [8] LINDENTHAL M, KOFLE J. Measuring the absolute photo-detection efficiency using photon number correlations[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(24): 6059-6064.
- [9] PERINA J, HAMAR M, HADERKA O. Absolute detector calibration using twin beams[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(13): 2075-2077.
- [10] BRIDA G, GENOVESE M, RUOBERCHERA I, *et al.* Possibility of absolute calibration of analog detectors by using parametric down-conversion: a systematic study[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, **23**(10): 2158-2193.
- [11] BRIDA G, CHEKHOVA M, GENOVESE M, *et al.* Absolute calibration of analog detector using stimulated parametric down conversion[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, **56**(2-3): 401-408.
- [12] TIMOTHY E. K, MORTON H, YANHUA S, *et al.* Theory of the three-photon entangled state[J]. *Physical Review A*, 1998, **57**(3): 2076-2079.
- [13] XIA Mao-peng, LI Jian-jun, GAO Dong-yang, *et al.* Absolute calibration of an analog InSb detector based on multimode spatial correlation of correlated photons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(24): 240601.  
夏茂鹏,李健军,高冬阳,等. 基于相关光子多模式相关性的 InSb 模拟探测器定标方法研究[J]. 物理学报,2015,**64**(24):240601.
- [14] 费页泰. 误差理论与数据处理[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2004.
- [15] 李景镇. 光学手册[M]. 陕西:陕西科学出版社,2010.