

文章编号: 0253-2239(2008)12-2325-05

基于参变下转换效应的光辐射定标方法

李健军 郑小兵 卢云君 张伟 邹鹏

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室, 合肥 安徽 230031)

摘要 介绍了一种新型的基于参变下转换效应的光辐射绝对定标方法, 利用固体钛宝石激光器倍频后产生的 351 nm 的激光光源抽运非线性 BBO 晶体, 制备了一对简并的参变下转换光子对(波长为 702 nm), 并利用晶体的角度调谐特性, 制备了另一对非简并的参变下转换光子对(波长为 633 nm 和 789 nm)。定标了光电倍增管的量子效率, 介绍了实验原理和定标装置, 系统分析了测量过程中引入的不确定度。结果表明, 参变下转换效应光辐射定标方法的相对合成不确定度小于 5.5%。参变下转换定标方法与传统的基于标准探测器的辐射定标方法作了一个对比, 表明两种定标方法相对误差小于 10%。

关键词 遥感; 参变下转换; 辐射定标; 不确定度

中图分类号 TN080 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082812.2325

Optical Radiometric Calibration Based on Parametric Down-Conversion Effect

Li Jianjun Zheng Xiaobing Lu Yunjun Zhang Wei Zou Peng

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

Abstract A new calibration method of detectors by using correlated photons generated in spontaneous parametric down-conversion effect of nonlinear crystal is proposed. A CW ultraviolet (351 nm), diode-pumped, frequency-doubled, solid-state laser is used to pump BBO crystal. The degenerate parametric down-conversion (PDC) photons with wavelengths of 702 nm were produced and by tuning crystal angle, nondegenerate PDC photons with wavelengths of 633nm and 789nm were also produced. The quantum efficiencies of the photomultiplier at the above wavelengths were measured respectively. An absolute calibration system of detector quantum efficiency was performed. And its principle and experimental setup were introduced. The calibration uncertainties of PDC method were analyzed systematically. The results show the total calibration relative uncertainties are less than 5.5%. In the end, a comparison between PDC effect method and conventional method based on standard detectors was performed. The results show that the relative difference of the two methods is less than 10%.

Key words remote sensing; parametric down-conversion (PDC); radiometric calibration; uncertainty

1 引言

目前在光学遥感常用定标方法有两种:一种是基于高精度黑体辐射源,另一种是 20 世纪 80 年才发展起来的基于低温辐射计的定标方法,由于它综合利用真空、低温、超导技术,极大地隔绝了环境热辐射,使光加热和电加热产生的温升达到了极大的等效。目前低温辐射计测量光功率的不确定度小于 0.02%^[1,2]。从工程应用的角度,希望辐射定标可建立在任何时间和空间都能准确重现的物理过程上。

基于参变下转换(PDC)效应为“无标准传递”的辐射定标提供极好的手段,在满足相位匹配的条件下产生的时间、空间、波长、偏振等相关的光子对作为定标光源,利用两光电探测器作为探测元件,并用符合电路测量两路相关信号,将符合测量值与触发计数值的比率来表征待定标光电探测器的量子效率^[3]。

目前有很多国家的计量研究室都在积极开展基于参变下转换效应的光辐射绝对定标方法研究,如英国的国家物理实验室(NPL)^[4],美国的国家标准

收稿日期: 2008-04-01; 收到修改稿日期: 2008-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(60378027)资助课题。

作者简介: 李健军(1978—),男,博士研究生,主要从事光学遥感器高精度辐射定标方面的研究。E-mail: jlli@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969—),男,博士,研究员,主要从事光辐射测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和光学海洋学等方面的研究。E-mail: xbzhen@aiofm.ac.cn

化及技术研究院(NIST)^[5],意大利的 IEN^[6] 研究小组,研究集中体现在利用这种新型的定标方法定标光辐射探测器(光子计数型)的量子效率。目前报道的最好定标精度差小于 0.1%^[5]。

结合课题组前期的工作基础^[7],本文利用晶体的角度调谐特性,分别制备出两对参变下转换光子对,定标了光电倍增管在 633 nm、702 nm 以及 789 nm 的量子效率,分析了探测器位置校准、背景杂散光、待定标通道光学损耗等对定标结果的影响。

2 定标原理

参变下转换光子是抽运光与二阶非线性系数 $[\chi^{(2)} \neq 0]$ 的晶体相互作用产生的,这个过程满足动量守恒定律和能量守恒定律^[8]:

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_0, \quad \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 = \mathbf{K}_0, \quad (1)$$

式中 ω 、 \mathbf{K} 分别为在晶体内部光子的频率和波矢,下标 1、2 指参变下转换过程产生的参变下转换光子对。

因为相关光子是成对产生的,若触发通道接收到一个参变下转换光子(称为空闲光子),在另外一个与之共轭的通道上可以唯一确定另一个光子的存在(称为信号光子),利用相关光子这种独特的性质可以用于评估光电探测器的量子效率。若用 η_T 、 η_D 分别表示触发探测器和待定标探测器的量子效率,则总的触发计数和总的符合计数可分别表示为

$$N_T = \tau_T \eta_T N, \quad (2)$$

$$N_C = \tau_T \tau_D \eta_T \eta_D N, \quad (3)$$

式中 τ_T 、 τ_D 分别为触发通道和待定标通道的总的透射率损耗, N 为在两个通道同时产生的参变下转换光子数速率。将(2)式除以(3)式,可以得到

$$\eta_D = \frac{1}{\tau_D} \frac{N_C}{N_T}. \quad (4)$$

若考虑到背景光触发计数 N_B 以及意外符合计数 N_A 对测量结果的影响,(4)式可以修正为

$$\eta_D = \frac{1}{\tau_D} \frac{N_C - N_A}{N_T - N_B}. \quad (5)$$

(5)式是定量评估光电探测器量子效率的原理公式。

3 实验装置

根据参变下转换效应定标原理,建立了如图 1 所示的实验装置。利用钛宝石连续激光器倍频后产生的 351 nm 的紫外光,经起偏器、衰减片、半波片、透镜后,垂直入射到 BBO 晶体上。抽运光经起偏器后呈水平偏振光,满足参变下转换对抽运光偏振的要求;加入衰减片可连续调节抽运光的输入功率;为了扣除杂散光的影响,在抽运光路中插入半波片;为了减小抽运光发散角对参变下转换产生效率的影响,在晶体前端插入一长焦透镜,落在晶体上的光斑约为 2 mm;为了减小抽运光和参变下转换光损耗,晶体的前后端面分别镀有 351 nm 和 600~800 nm 的增透膜。晶体的切割角是 36.4°,产生了共线简并的参变下转换光子对,波长均为 702 nm,晶体外部两参变下转换光子的辐射角均为 8.43°;产生另外一对参变下转换光子的波长分别为 633 nm 和 789 nm,对应晶体的相位匹配角是 36.16°,通过电控旋转台将晶体沿法线方向顺时针旋转 0.24° 获得,晶体外部两参变下转换光子的辐射角度分别为 7.42° 和 9.26°。为了减小杂散光的影响,在触发通道和待定标通道分别放置直径 6 mm 和 15 mm 的孔径光阑,为了减小待定标通道的几何损耗,待定标通道的光阑较触发通道光阑大,以尽可能大的收集与触发通道相关的光子数。在光阑和探测器之间放置窄带干涉滤光片以提高参变下转换光子对测量信噪比。

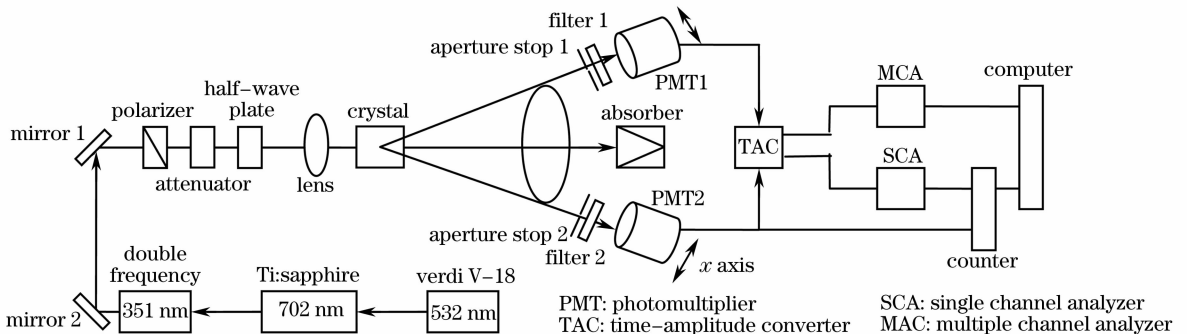


图 1 基于参变下转换效应定标光电倍增管量子效率实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of quantum efficiency calibration of photomultiplier based on PDC effect

4 结果及讨论

4.1 光路校准

为了最大化收集参变下转换光子信号,对触发通道和待定标通道进行了横向扫描(垂直于参变下转换光子辐射方向)。若触发探测器在扫描过程中获得最大计数位置,作为触发探测器位置。再横向扫描待定标通道探测器,利用时/幅转换器(TAC)和单通道分析器(SCA)测量同时到达的相关光子信号,即所谓的符合计数,对应最大符合计数位置作为待定标探测器的位置。此时定标系统具有最大的参变下转换光子收集效率。图 2(a)、图 2(b)分别是对触发探测器和待定标探测器在横向扫描时观察到的测量结果(待定标波长为 702 nm)。

图 2(a) 表示的是触发探测器在横向扫描时观

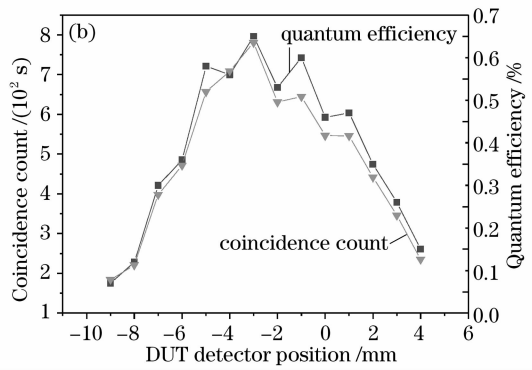
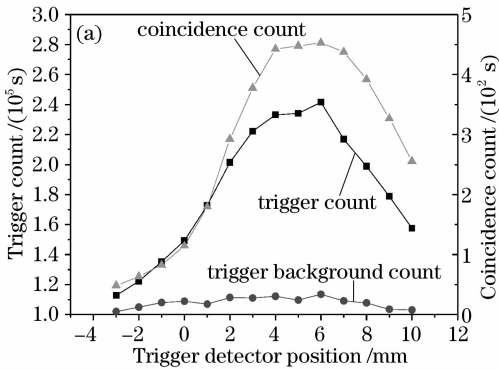


图 2 探测器横向扫描曲线。(a)触发通道扫描,(b)待定标通道扫描

Fig. 2 Curve of detectors scanned transversely. (a) Trigger channel scanning, (b) DUT channel scanning

采用同样的扫描方法,还测量了待定标探测器在 633 nm 和 789 nm 的量子效率,分别为(3.112 ± 0.003)%、(0.617 ± 0.003)%。这里的量子效率是考虑到待定标通道的光学损耗以及电路死时间后修正后的结果。

4.2 背景扣除

影响参变下转换效应定标精度的另一个重要的方面是扣除来自晶体端面的抽运光的散射光,以及其他的外界杂散光的影响。由于参变下转换过程有严格的偏振取向性,即只有一个偏振方向的抽运光子与晶体作用才能产生参变下转换,因此将抽运光偏振方向旋转 90°就可关闭参变下转换过程,但此时抽运光的散射光的大小却不发生改变。在图 1 所示抽运光路中插入格兰-泰勒棱镜即可保证输入的抽运光具有较高的线偏振度,可精确评价背景杂散光的影响。图 3 是在定标光电倍增管在 702 nm 量子效率时,旋转半波片时观察到的符合计数和触发端的计数。可见,当波片旋转到 45°,触发端的背景

察到的触发计数以及符合计数随探测器位置的变化,在距离原点 6 mm 处可以观察到最大的触发通道计数约为 $2.4 \times 10^5/s$,此时对应的符合通道计数值也最大,约为 $4.5 \times 10^2/s$ 。探测器在距离原点 4~6 mm 之间移动时,符合计数值较平坦,因此落在触发探测器上的参变下转换光子的辐射宽度约为 3 mm。此时的触发端有效信号计数速率(触发计数减去背景触发计数)也近似保持不变,约为 $1.2 \times 10^5/s$ 。

图 2(b)表示是待定标通道在横向扫描的过程中观察到的符合计数以及待定标通道的量子效率随探测器位置的变化,在距离原点 3 mm 处,获得了最大的符合计数值,约为 $7.8 \times 10^2/s$,由此获得光电倍增管在 702 nm 的量子效率约为(1.633 ± 0.003)%。

约为 $1.5 \times 10^4/s$,符合计数值为 4/s,近似为背景所产生的意外符合。当波片位于 0°或 90°位置时,触发端的计数约为 $6.0 \times 10^4/s$,符合计数变为 $3 \times 10^2/s$ 。

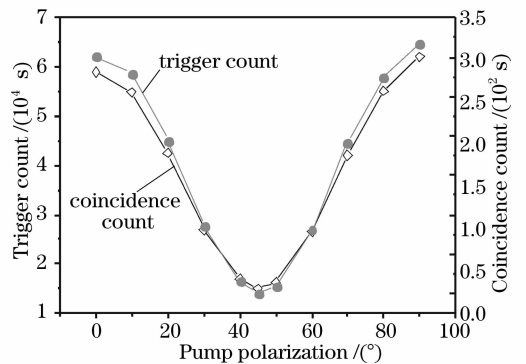


图 3 旋转抽运光偏振方向时观察到的触发计数和符合计数的变化

Fig. 3 Trigger counts and coincidence counts as the pump light polarization direction is rotated

4.3 参变下转换效应定标不确定度分析

根据(5)式,由不确定度传递定律^[9],可系统地

评估光电倍增管量子效率定标过程中引入的不确定度,如表 1。触发通道计数、背景计数、符合计数以及意外符合计数分别测量 5 次,每次采样时间为 10 s。待定标通道的总的透射率是由晶体的菲涅耳(Fresnel)反射损耗、Fresnel 透射损耗以及干涉滤光片的透过率引起的,其中,Fresnel 反射损耗、Fresnel 透射损耗是由菲涅耳公式来评估的,因此表 1 中没有引入这两项的测量不确定度^[10]。干涉滤光片的透射率是根据 U3410 分光光度计重复测量 5 次取相对标准偏差获取的。

表 1 光电倍增管量子效率的参变下转换方法定标不确定度估算 ($/10^{-3}$)

Table 2 Uncertainty estimation of the photomultiplier quantum efficiency using PDC effect method ($/10^{-3}$)

Uncertainty factors	$\lambda=633\text{ nm}$	$\lambda=702\text{ nm}$	$\lambda=789\text{ nm}$
Interference filter transmittance	5.61	2.03	3.22
Repeatability	11.01	12.31	9.82
Trigger counts	7.13	2.16	5.31
Trigger background counts	5.01	0.68	3.64
Coincidence counts	51.65	29.70	40.42
Incidental coincidence counts	1.52	2.42	5.61
Total uncertainty	53.84	32.38	42.59

由表 1 可见,定标过程的不确定度主要是由抽运光信号的统计起伏以及信号的采样时间决定的,若能提高抽运光的稳定性,增加采样时间,就能减小触发通道计数、背景计数、符合计数、以及意外符合计数的测量不确定度。

4.4 与传统定标方法的对比

为了验证参变下转换效应定标方法的精度,将其与传统的基于标准探测器定标方法作了一个对比。如图 4 所示,激光光源经激光功率控制器(LPC)稳定后,在光路中依次插入四片中性密度滤光片,为了减小滤光片之间内反射对测量结果的影响,将滤光片相互倾斜 1° 放置。在四片中性密度滤光片后固定待定标的光电倍增管。在光学设计过程中,首先插入中性密度滤光片 4、3,用自行研制的多

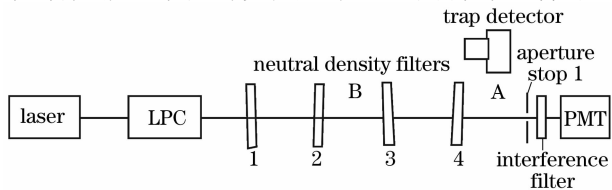


图 4 利用传统定标方法测量光电倍增管量子效率实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of quantum efficiency calibration of photomultiplier using conventional method

增益陷阱探测器分别在 10 k Ω 以及 100 M Ω 档测量有无中性密度滤光片时探测器输出的电压值,根据滤光片插入前后多增益陷阱探测器测量的两次绝对光通量的比率来评估中性密度滤光片 4、3 的联合透射率 T_A 。同样在位置 B 处,测量中性密度滤光片 2、1 的联合透射率 T_B 。为了减小测量系统杂散光影响,将光电倍增管以及滤光片组放置在黑箱内。

传统方法定标光电倍增管量子效率为

$$\eta = \frac{C_s - C_B}{P_0 T_A T_B T_F / (hc/\lambda)}. \quad (6)$$

式中 T_F 为干涉滤光片的透射率; λ 为待定标波长; h 为普朗克常数; C_s 、 C_B 分别为光电倍增管在单位时间测量的信号计数和背景计数, P_0 为未加滤光片时,陷阱探测器测量的绝对功率值。

根据(6)式,获得光电倍增管在 633 nm、702 nm 以及 789 nm 三个波段的量子效率分别为 $(3.401 \pm 0.002)\%$ 、 $(2.019 \pm 0.002)\%$ 、 $(0.773 \pm 0.002)\%$ 。若用相对误差来表示两种定标方法的一致程度^[11],即

$$E_R = \frac{|M_P - M_C|}{M_C} \times 100\%, \quad (7)$$

式中 E_R 为相对误差, M_P 为参变下转换定标方法的测量值, M_C 为传统定标方法的测量值。

根据(7)式,得到两种定标方法定标在 633 nm、702 nm、789 nm 波段的相对误差分别为 8.5%、9.9%、5.2%。图 5 是参变下转换定标方法和传统定标方法获得的定标结果。

由图 5 可知,传统方法定标与参变下转换定标变化趋势基本相同,但利用传统定标方法获得量子效率的测量结果高于参变下转换定标方法。原因有以下两个方面:由于中性密度滤光片透射率采用分立定标的方式进行定标,四片滤光片总的透射率应略高于两滤光片之积;实际定标过程中没有扣除滤

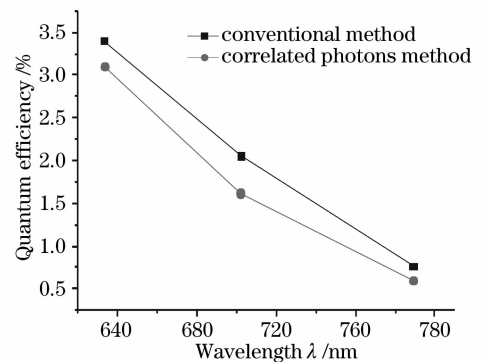


图 5 用传统定标方法和参变下转换方法获得的定标结果
Fig. 5 Calibration results with conventional method and the proposed PDC effect method

光片之间的内反射产生的杂散光影响,使光电倍增管测量的信号计数比实际的绝对辐射值要高。

5 结 论

介绍一种基于非线性晶体参变下转换效应的光辐射定标方法。根据晶体的可调谐特性,分别定标了光电倍增管在 633 nm、702 nm 和 789 nm 处的量子效率,结果表明,测量结果相对合成不确定度小于 5.5%。设计了多增益陷阱探测器测量中性密度滤光片透射率,参变下转换定标方法与传统的辐射定标方法的不一致性小于 10%。

参 考 文 献

- Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping *et al.*. High-accuracy primary and transfer standards for radiometric calibration[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(21): 2009~2013
- Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping *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. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱[J]. *光学学报*, 2000, **21**(6): 749~752
- Feng Yu, Zheng Xiaobing, Li Jianjun *et al.*. Research in absolute calibration of single photon detectors by means of correlated photons[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6): 315~317
- J. Y. Cheung, M. P. Vaughan, J. R. Mountford *et al.*. Correlated photon metrology of detectors and sources[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **5161**: 365~376
- S. V. Polyakov, A. L. Migdall. High accuracy verification of a correlated photon-based method for determining photon-counting detection efficiency[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(4): 1390~1407
- G. Brida, S. Castelletto, I. P. Degiovanni *et al.*. Quantum efficiency and dead time of single-photon counting photodiodes: a comparison between two measurement techniques[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 625~628
- 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绝对定标方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 457~460
- D. N. Klyshko. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors[J]. *Sov. Quant. Electron.*, 1980, **10**(11): 1112~1116
- B. N. Taylor, C. E. Kuyatt. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results[R]. MD 20899-0001, 1994
- S. V. Polyakov, A. L. Migdall. High accuracy verification of a correlated photon-based method for determining photon-counting detection efficiency[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(4): 1390~1407
- Fei Yetai. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004
费页泰. *误差理论与数据处理* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004