

相关光子方法绝对定标光电探测器量子效率应用研究综述*

冯瑜¹, 郑小兵¹, 张海东², 李健军¹, 乔延利¹

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;

2. 南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏南京 210097

提要:相关光子是由强光泵浦非线性晶体的自发参量下转换(spontaneous parametric down conversion, SPDC)效应而产生的。文中从量子理论简要说明相关光子的产生机理以及经典光学解释。阐述了相关光子方法定标探测器量子效率的原理,对比传统定标方法,指出相关光子方法的优点。总结了该领域的最新研究进展,分析了这些方法的基本思想和各自的优缺点。提出下一步研究的方向以及可实现的方法,展望了该领域的发展前景。

关键词:非线性光学;量子光学;相关光子;量子效率;绝对定标

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

文章编号:0253-2743(2006)05-0009-03

Investigative summarization of correlated photons and application in absolute quantum efficiency calibration of detector

FENG Yu¹, ZHENG Xiao-bing¹, ZHANG Hai-dong², LI Jian-jun¹, QIAO Yan-li¹

1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei, 230031, China;

2. School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China

Abstract: Correlated photons are generated in spontaneous parametric down-conversion (SPDC) effect of nonlinear crystal pumped by highly intensity laser. Generation mechanism of correlated photons is explained compendiously by theory of quantum mechanics; interpretation of classical optics is also shown. The theory of detector calibration in quantum efficiency based correlated photons method is demonstrated. Comparing with traditional methods, the advantages of it are pointed out. The latest advances in the field are described here; fundamental ideas, advantages and disadvantages of these methods are analyzed. The next direction of investigation and the method of realization are mentioned. The future of this field is also presented in this paper.

Key words: Nonlinear optics; quantum optics; correlated photons; quantum efficiency; absolute calibration

1 引言

辐射定标,是指建立光辐射传感器的输出与相应已知的、用国际单位制(SI)表示的辐射标准之间的定量关系。它是辐射度学和光度学的主要研究内容。近年来,由于空间遥感、环境监测等领域的定量化要求不断提高,光辐射传感器的定标成为保证遥感数据精度和可利用价值的基础支撑技术。它在大气层外太阳总辐射的长期监测、全球热量平衡与气候变化、海洋初级生产力的评估等基础研究中发挥着关键作用。在遥感研究中,辐射定标一般指确定光辐射传感器的响应率,或者光电转换的量子效率。

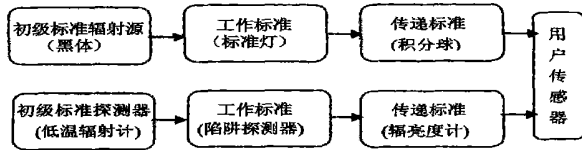


图1 目前辐射定标的两种标准传递链

目前光辐射传感器的定标一般采用两种方法^[1]:基于辐射源和基于探测器,如图1所示。它们的共同点是:需要建立高精度的初级标准以及不同精度等级的标准器,建立直至用户的标准传递链。

精密温控黑体通常被用作初级标准辐射源;近年来发展起来的低温辐射计^[2]是目前精度最高的探测器,在低温下用电替代法实现光辐射的绝对测量,容易在各种平台上与传感

器结合,常作为初级标准探测器。美、英、德等国的国家标准实验室均在发展各波段的标准探测器技术。在国内,中国计量科学研究院^[3]和中科院安徽光机所^[4]开展了这两种定标方法的研究,前者侧重于计量标准的建立和保持,后者致力于发展与我国空间遥感相适应的应用定标技术,目前在高精度定标方面居于国内领先地位^[5]。

标准传递链保证了各种传感器的响应可以溯源到一个共同基准,但也限制了标准的工程可复现性和精度的有效提高。由于要根据不同的定标要求设计传递链,不但增加了定标系统设计难度,还造成精度随传递环节的增加而逐级降低。从国内外的研究结果看,标准传递过程是限制传感器精度有效提高的瓶颈之一,这在红外波段表现尤为突出。例如:在短波红外波段,初级光谱辐亮度标准的精度可达到0.2%,但国内外空间传感器在这一波段的精度很难优于5%^[6]。

从提高精度的角度出发,希望光辐射探测器的定标建立在一种可在任何时间和地点准确重现的客观物理过程上,而不依赖于某个探测器或某种传递过程,相关光子为实现“无标准传递”的辐射定标提供了极好的手段。

2 相关光子的产生机理

根据非线性光学三波混频原理,当两束频率不同的光入射到非线性晶体上,将产生频率不同的极化行波,如果极化行波在晶体中传播的速度与电磁波自由传播的速度一致,将引起累积增长。由Manley-Rowe关系,每湮没一个高频光子,同时要产生两个低频光子。频率为 ω_p 的泵浦光入射非线性晶体后,在晶体内产生一个频率为 ω_s 与频率为 ω_i 的光子对,形成光参量放大。此过程满足能量守恒和动量守恒条件(相位匹配条件):

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad k_p = k_s + k_i \quad (1)$$

收稿日期:2005-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目,批准号:60378127。

作者简介:冯瑜(1977-),辽宁抚顺人,中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生,目前从事相关光子方法定标光辐射探测器量子效率的研究工作。

当仅有泵浦光作用时,由量子真空噪声和原子相互作用产生的自发辐射光子与泵浦光子进行混频,自发辐射光子经参量放大后输出,形成相关光子,如图2所示。由于自发辐射为连续光谱,相关光子就具有从泵浦频率到晶格共振频率范围的宽光谱分布。

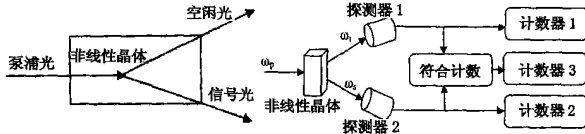


图2 自发参量下转换示意图 图3 测量光电探测器绝对量子效率的相关光子方法

以上只是对相关光子的经典解释,要真正理解相关光子的产生机理,必须采用量子理论^[7]。由于 SPDC 过程中泵浦光为强光,可作经典处理,而对下转换光需作量子化处理。求出三波场组成的体系哈密顿量子力学表示:

$$H = \sum_i \hbar \omega_i (\hat{a}_i^\dagger \hat{a}_i + \frac{1}{2}) + S \hbar \cos \theta (\hat{a}_1^\dagger - \hat{a}_1) (\hat{a}_2^\dagger - \hat{a}_2) \quad (2)$$

式中, S是与泵浦振幅成正比的参数。由海森堡表象中任意时刻的波函数等于初始时刻的波函数,利用产生和湮灭算符的性质及正交条件,求出任意时刻下转换光子数:

$$\langle n_1(t) \rangle = n_{10} \cosh^2 \frac{St}{2} + (1 + n_{20}) \sinh^2 \frac{St}{2} \quad (3)$$

$$\langle n_2(t) \rangle = n_{20} \cosh^2 \frac{St}{2} + (1 + n_{10}) \sinh^2 \frac{St}{2} \quad (4)$$

等式右边的(1 + n₁₀)和(1 + n₂₀)中的“1”是由于产生和湮灭算符之间的非对易性引起的,是量子力学固有规律所决定的。说明,在没有任何输入的情况下(即 n₁₀ = 0, n₂₀ = 0),通过参量过程,下转换光子的输出也可以建立起来,并有

$$\langle n_1(t) \rangle = \langle n_2(t) \rangle = \sinh^2 \left(\frac{St}{2} \right) \quad (5)$$

这一项是噪声光子,印证了只有量子理论才能解释相关光子起因的论断。

3 相关光子方法绝对定标探测器量子效率

由于相关光子对在时间、偏振、频率和自旋等方面具有的相关特性,利用这些相关特性就可以实现“无标准传递”的辐射定标。前苏联、美国、意大利等国的国家标准实验室的科学家们都在开展此方向的研究工作。相关光子定标的基本原理如下:

当泵浦光作用于合适的非线性晶体并满足位相匹配条件,泵浦光子通过参量下转换衰变为一对相关光子。由于光子在发射时间、波长、方向和偏振状态上的完全相关性,探测到一个光子,就可以完全确定另一个光子的存在。这样就可以绝对测量探测器的量子效率,原理如图3。

两相关光子分别被探测器1和2接收,它们的输出由计数器记数,其记数概率分别为:

$$M_1 = \eta_1 \langle N_1 \rangle, M_2 = \eta_2 \langle N_2 \rangle \quad (6)$$

其中, η₁、η₂是两探测器的量子效率,⟨N₁⟩、⟨N₂⟩是到达探测器的一个模式的平均光子数。在第三个通道中记录两探测器输出的符合概率,可知:

$$M_c = \eta_1 \eta_2 \langle N_c \rangle \quad (7)$$

其中,⟨N_c⟩是同时到达两个探测器的平均光子数,由于⟨N₁⟩ = ⟨N₂⟩ = ⟨N_c⟩,于是两探测器的量子效率分别为:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= M_c / M_2 \\ \eta_2 &= M_c / M_1 \end{aligned} \quad (8)$$

3.1 探测器量子效率的绝对定标

Klyshko 首先提出了基于相关光子的绝对测量光电探测器量子效率的方案^[8]。Migdall 小组于 1996 年^[9],Brida 小组于 1999 年^[10]使用 351nm 氙离子激光器泵浦 KDP 晶体和 LiIO₃ 晶体的 I 类相位匹配,实现了对光电倍增管量子效率的定标。雪崩二极管作为参考通道探测器,光电倍增管为待定标探测器。两路探测器输出信号分别经过前放电路后,参考通道的输出分为两路:一路输出作为触发脉冲送给 TAC(时间振幅转换器),另一路送计数器 1;待定标通道输出也分为两路:一路输出经延时电路后,作为终止脉冲送 TAC,另一路送计数器 2。TAC 输出送给 MCA(多通道分析器)测量脉冲的分布,同时经 SCA(单通道分析器)选择符合脉冲后送符合计数器。根据公式 8,就可以计算出待定标探测器量子效率。实验结果与传统方法比较,差异约为 0.6%,证实了利用相关光子方法绝对测量探测器量子效率的有效性。图 4 为实验原理图。

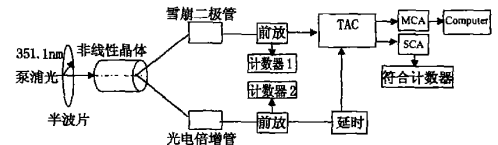


图4 利用相关光子绝对测量探测器量子效率

3.2 探测器量子效率的自绝对定标

2000 年,Czitrovszky 与 Sergienko 提出只需要一个探测器的量子效率自身绝对定标方案。该方案的主要缺点是要求探测器能够分辨是一个还是两个光子到达探测器表面,并且用光子流的概念代替单位时间内产生的光子数。这样就限制了可定标探测器的类型,而且必须假设泵浦光及下转换过程足够稳定,它本质上已经不再是一种绝对定标方法了。中科院物理所的常君 和吴令安于 2003 年提出一种对各种现有单光子探测器自身绝对定标的方案^[11](参见图 5)。

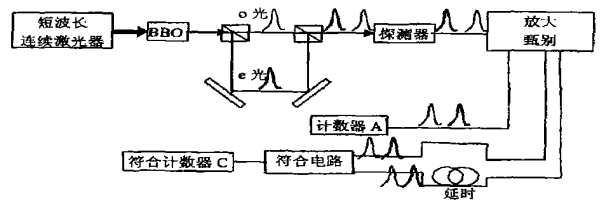


图5 单光子探测器的自绝对定标

它的基本思想是:利用短波长连续激光器泵浦 BBO 晶体的共线 I 类匹配,产生偏振纠缠相关光子。假定信号光子为寻常光(o 光),则空闲光子为非寻常光(e 光),用两偏振分光棱镜造成相关光子的光程差,使原本同时产生的光子对之间出现延时,探测器以某一概率(量子效率)探测双光子,将输出信号放大、甄别后,分三路输出给后续电路。一路直接送给计数器 A,第二路和经过电子延时的第三路送给符合计数器 C,使得第三路信号的 o 光脉冲与第二路信号 e 光脉冲产生符合计数。可知计数概率分别为:

$$\begin{aligned} N_A &= 2N \cdot \eta \\ N_C &= N \cdot \eta^2 \end{aligned} \quad (9)$$

因此,探测器量子效率为: η = 2N_c/N_A (10)

这就实现了单光子探测器量子效率的绝对自身定标。

另外,针对高重复频率脉冲激光光源,冯少晖于2004年提出了一种单光子探测器自绝对定标的改进方案^[12],该方法利用同轴电缆短路时,脉冲回波反相的原理。用数据采集卡与计算机代替上述方案中的符合测量系统,也可以对探测器量子效率绝对定标。

3.3 条件偏振旋转绝对定标探测器量子效率

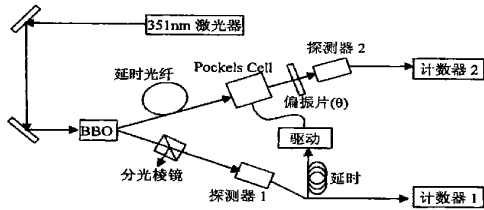


图6 条件偏振旋转绝对定标探测器量子效率

2005年Brida又提出一种用相关光子方法绝对测量探测器量子效率的方案^[13]。该方法利用BBO晶体的类非共线匹配产生偏振纠缠相关光子(原理如图6)。类非共线匹配的相关光子是正交偏振的,当沿信号光方向得到垂直偏振光子时,空闲光子就一定是水平偏振的,反之亦然。经过偏振分光棱镜选择垂直偏振光子(信号)直接引入探测器1,探测器输出经延时后接泡克尔斯单元(PC)驱动电路,驱动PC工作,将经过光纤延时的光子(空闲)的偏振态旋转90°,该空闲光子经偏振片后输入探测器2。探测器2的计数率表达式如下:

$$w_2(\theta) = \frac{1}{2} \cdot w_0 (1 - \eta_1 \cdot \cos(2\theta)) \quad (11)$$

其中 η_1 是空闲光路的透过率, η_2 为探测器2量子效率, w_0 是光子对的产生速率, θ 是偏振片与水平轴夹角。当探测器1有效地探测到垂直偏振光子时,驱动PC工作,否则不工作。这样空闲光子的偏振态就取决于探测器1的量子效率,因此空闲光计数率 w_2 的能见度 ν 就等于 η_1 ,表达式为:

$$\nu = \frac{\max(w_2) - \min(w_2)}{\max(w_2) + \min(w_2)} = \eta_1 \quad (12)$$

测量结果与传统方法对比,差异在1%以内,通过完善实验装置,不确定度有望进一步减小。

4 分析与结论

通过以上三种基于相关光子方法绝对测量光电探测器量子效率的方案,可以确定相关光子定标方法的可行性和可靠性。与基于辐射源和基于探测器的方法相比,它的优点在于:(1)是具有准确可复现性的绝对定标过程;(2)无需标准传递链,减少了因标准传递带来的误差;(3)参考传感器的量子效率对定标结果无影响;(4)能够获得“可见—红外”相关光子对,实现用高精度可见波段传感器定标红外波段传感器。(5)可以任选一路探测器作为参考通道,利用分光元件选择参考通道的中心波长和带宽来确定待定标通道的波长和带宽,从而实现连续光谱定标。

由于分别利用了自发参量下转换的不同相位匹配方式,上述三方案又各具特色。方案一:采用类非共线相位匹配,光子对在时间和方向上高度相关,利用符合测量技术实现探测器的绝对定标。相关光子在空间上容易区分,且利用了成熟的符合技术是它的特点。方案二:采用类共线相位匹配,光子对在时间和偏振上高度相关,通过光路延时让同时产生的相关光子先后到达探测器,再经过电器延时及符合

测量技术实现探测器的自身绝对定标。它不需要引入任何参照标准或其它探测器,更简便、更具普遍适用性。方案三:采用类非共线相位匹配,光子对在时间、方向和偏振上高度相关,利用非局域效应实时主动地控制相关光子的偏振态,一个光子的探测效率决定了另一个光子的偏振态,从而实现探测器的绝对定标。它不需要使用复杂的符合测量装置,仅需要一个计数器即可,减少了由于符合测量各部分仪器的死时间等因素而引入的不确定度。

综上所述,绝对定标探测器量子效率的相关光子方法具有相当的精度和发展潜力,应该说是探测器辐射定标技术未来的发展方向。目前的局限性在于:它还只能工作在单光子模式下,无法应用于模拟探测器定标;此外,测量结果的不确定度与基于辐射源和基于探测器方法相比,还有一定的差距。

要实现模拟探测器的定标,就是要提高参量下转换的效率;它可以通过提高泵浦光功率以及对参量下转换装置的优化配置来实现;寻找高效的非线性晶体也是非常有效的途径之一。要降低测量结果的不确定度,就需要精确定位下转换光子以及提高符合测量装置的性能;采用尽可能少的和高质量的光学元件,减少引入的误差;采用完全黑暗的实验室环境,尽量减小背景噪声对相关光子的影响都可以降低测量不确定度。另外,根据相关光子原理,提出新的行之有效的测量方案,也将是非常有意义的。我们有理由相信:随着对该方法的原理和实验的进一步研究,上述困难都可能被克服,它的应用前景将是一片光明的。

参考文献

- [1] W. R. Blevin. Optical radiometry - one hundred years after Stefan and Boltzmann [C]. Proceedings of the 2nd International conference held, eds., N. P. Fox and D. H. Nettleton. 1988, 1 - 9.
- [2] T. R. Gentile, et al. The NIST high accuracy cryogenic radiometer [J]. Appl. Opt., 1996, 35 (7): 1056 - 1068.
- [3] 姚和军. 陷阱式探测器的结构、性质及其在计量学中的应用 [D]. 博士论文, 清华大学电子工程系, 2001, 7.
- [4] Zheng, Xiaobing, Haoyu Wu, Junping Zhang, et al. High - accuracy primary and transfer standards for radiometric calibration [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (21): 2009 - 2012.
- [5] 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, 2000, 21 (6): 749 - 752.
- [6] M. King and R. Greenstone. EOS Reference handbook [M]. EOS Project Science Office, NASA, 1999, 89 - 150.
- [7] 刘树杞, 卢亚雄, 张世昌等. 量子电子学 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 电子工业出版社, 1990, 242—245.
- [8] Klyshko D.N. Use of two - photon light for absolute calibration of photoelectric detectors [J]. Sov J. Quantum Electron, 1980, 10(9): 1112 - 1116.
- [9] A. L. Migdall, R. U. Datta, A. Sergienko, et al. Absolute detector quantum - efficiency measurements using correlated photons [J]. Metrologia, 1995/96, 32: 479 - 483.
- [10] G. Brida, S. Castelletto, C. Novero, et al. Quantum - efficiency measurement of photodetectors by means of correlated photons [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1999, 16(10): 1623 - 1627.
- [11] 常君, 吴令安. 单光子探测器量子效率的绝对自身标定方法 [J]. 物理学报, 2003, 52(5): 1132 - 1135.
- [12] 冯少晖, 梁林梅, 田成林等. 单光子探测器量子效率绝对自身标定方案 [J]. 量子光学学报, 2004, 10(4): 176 - 179.
- [13] G. Brida, M. Genovese, M. Gamegna, et al. Single - photon detector calibration by means of conditional polarization rotation [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2005, 22 (2): 488 - 492.