

单光子探测器量子效率的绝对自身标定方法*

常君弢 吴令安

(中国科学院物理研究所光物理开放实验室,北京 100080)

(2002 年 9 月 30 日收到,2002 年 10 月 19 日收到修改稿)

提出一种单光子探测器量子效率的绝对自身标定方案,利用光参量下转换过程中产生的光子对在时间上的相关性,先将参量光束分为两路,然后引入相对延时,使同时产生的孪生光子先后进入单光子探测器,然后将探测器之后的电路分为三路,其中一路直接进入计数器得到探测器所探测到的光子的总计数率,另两路用电路方法引入和光路相当的相对延时,经符合电路后进入计数器,得到前后到达探测器的光子对之间的符合计数率.这样,从符合计数率与总光子计数率之比即可在不需要任何其他探测器或者参照标准的情况下获得探测器的量子效率.文中给出两种方案,分别适合连续激光器和重复频率脉冲激光器.

关键词:自绝对标定,量子效率,单光子探测器,符合测量,参量下转换

PACC:0620H,4250,2970,2970F

所谓单光子探测器的量子效率,定义为探测器接收到入射光子流后产生的光子计数与入射光子数之比.在计量技术领域,科学实验及光电检测领域,尤其是在未来的量子通信领域,单光子探测器的量子效率的标定工作有着极其重要的意义.传统的标定方法需要借用标准探测器或者标准辐射源,实现起来昂贵而不方便,其测量不确定度也受制于所谓的“标准器”的限制.

20 世纪 80 年代以后,发展出一种不借助任何参考标准也不涉及单光子探测器其他指标的单光子量子效率的绝对标定方法. Klyshko 在 1980 年提出这种方法的理论基础之后^[1],很快就得到实验上的应用^[2-5],其基本原理是利用非线性光学过程——参量下转换过程中所产生的光子对的纠缠性质,参见图 1.抽运激光的一个光子在某些非线性光学晶体中在适当条件下产生一对光子,这一过程遵循能量守恒和动量守恒,即

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i \quad (2)$$

其中 ω 和 \mathbf{k} 分别是光子频率和波矢,下标 p, s, i 分别对应于抽运光(pump)和下转换产生的一对光子,即信号光(signal)和闲置光(idler)光子.

由于(1)式所蕴涵的制约关系,当我们知道了抽

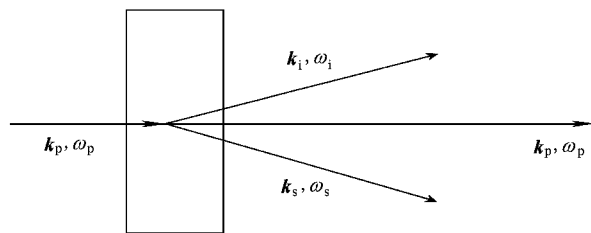


图 1 参量下转换过程

运光和任一出射光的信息后,就可以知道另一出射光的有关信息.由此发展起来的典型的绝对标定的装置如图 2,探测器 A 和探测器 B 分别以量子效率 η_A, η_B 俘获抽运激光在非线性晶体中发生参量下转换过程所产生的的信号光光子和闲置光光子.若单位时间内产生 N 对光子,则待标定的探测器 A 会测到 $N_A = \eta_A N$ 个信号光子.探测器 B 可作为触发探测器,它的一个计数就表明测到一个闲置光子,计数率设为 $N_B = \eta_B N$.由于光子是成对产生的,因此在探测器 A 处必定有一个信号光子(但不一定被 A 记录到).对于每一次被 B 探测到的事件,通过符合电路来检测探测器 A 是否探测到相应的事件,符合计数率则为 $N_C = \eta_A \eta_B N$.因此可以推出,探测器 A 的量子效率 η_A 就等于符合计数率 N_C 与探测器 B 的计数

* 国家自然科学基金(批准号:19974073 和 60178013),国家重点基础研究发展规划项目(批准号:2001CB309300),中国科学院计量测试高技术联合实验室和中国科学院创新方向性基金资助的课题.

率 N_B 之比率,即

$$\eta_A = N_C / N_B. \quad (3)$$

由此可以看出,探测器 A 的量子效率的测定与探测器 B 的量子效率无关,也不需要任何其他参考标准,所以这是一种绝对的标定方法.但是,从上面也可以看出,这种方法必须有两个探测器才能实现对一个探测器的量子效率的标定,而且考虑到参量下转换过程所产生的双光子场在空间分布上的特性,就会有对两个探测器的接收面大小、方位等方面的限制.因而在一定程度上带来了方案的复杂性,增加了标定过程中的不确定度,限制了其应用.

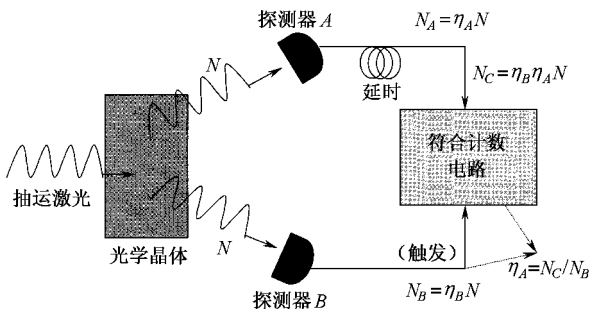


图 2 绝对标定一般装置

在 2000 年 Czitrovszky 等人提出只需要一个探测器的绝对标定其量子效率的方案^[6],但是该方案有两个缺陷.其一,要求探测器能够分辨是一个光子还是两个光子到达探测器光敏表面,这样该方法就只能适用于光电倍增管,不能应用于雪崩二极管单光子探测器(而这种类型的探测器的优势是波长范围

可到近红外且量子效率高),即使是对于光电倍增管,这一要求也是过分接近理想情况而很难达到.其二,他们的方法实际上是用光子流(photon flux)的概念代替前面讨论的绝对标定方法中的(在某一时间段内的)光子数(photon number),从而用探测器在不同时间内分别对信号光子和闲置光子的响应应用到类似上述绝对标定的计算中去.这种替代法测量的不是真正的信号光子和闲置光子的一一对应,必须假设抽运激光源以及下转换过程足够稳定,因而本质上已经不再是一种绝对的标定方法了.

本文提出的方案,可以实现各种现有单光子探测器的自身绝对标定,即对于任何一个单光子探测器,利用它自己就可以对其量子效率进行绝对标定.

参见图 3,抽运源是一种短波长的连续波激光器,其激光经过非线性晶体,比如 BBO,通过 II 型参量下转换过程产生纠缠的简并光子对:信号光光子(寻常光,即 o 光)和闲置光光子(非寻常光,即 e 光).使用 45°全反镜反射掉出射光中夹杂的抽运激光,然后使信号光和闲置光同时进入偏振分束器 P_1 ,分别沿 o 光光路传播,利用两个平面反射镜使 o 光光程比 e 光光程长 $\Delta\tau \cdot c/n$ (c 是真空光速, n 是空气折射率),这样使得原本同时产生的信号、闲置光子对之间出现延时 $\Delta\tau$,并通过另一个偏振分束器 P_2 再将两条光路合并,闲置光、信号光光子先后进入单光子探测器.时间延时 $\Delta\tau$ 要选择合适的值,不能大于产生两对参量光子的时间间隔.单光子探测器以某一概率 η (即探测器对该波段光子的量子效率)对到达的光子作出响应,每次响应就对应给出一

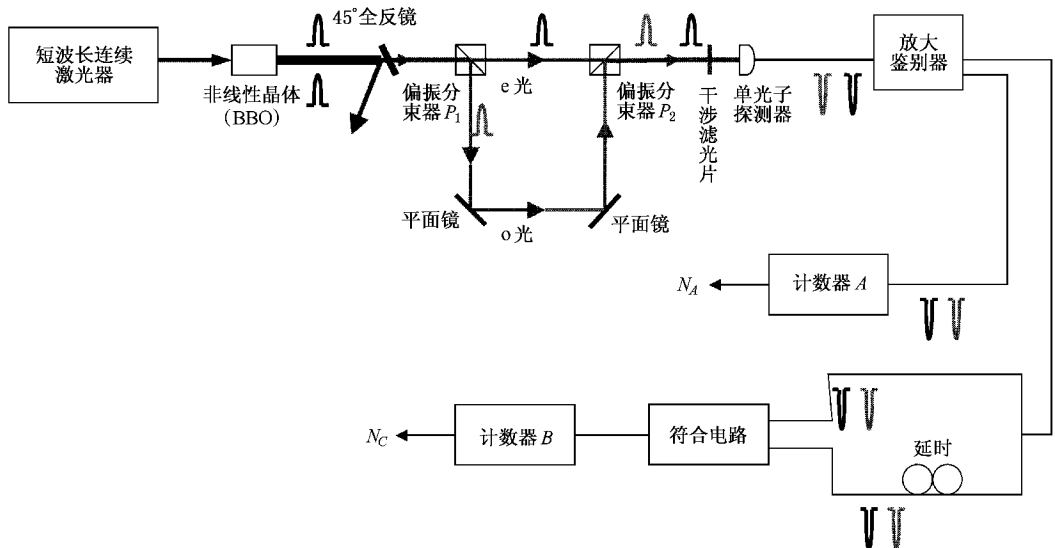


图 3 连续激光抽运方案

个负脉冲电流,进入本方案所设计的电路部分.

图 4 是电路部分的工作原理.图 4(a)是考虑对于探测器依次对先后到达的两个光子都有了响应的情况,鉴别放大器输出相应的前后两个标准 NIM 信号(前后时间间隔 $\Delta\tau$),并且分成三路输出:一路直接输出到计数器 A,得到计数 $N_A = 2$;第二、第三路送到符合电路,但第三路先经过 $\Delta\tau$ 的电延时,它的两个 NIM 信号在时间上同时后移 $\Delta\tau$.这样相对第二路电信号,形成了如图 4 中所示的情况,第三路上的前一个 NIM 信号和第二路上的后一个 NIM 信号在时间上重叠.这样,当第二路信号和第三路信号同时进入符合电路后,就输出一个标准 NIM 信号,计数器 B 的计数进一位,得到 $N_C = 1$,表示探测器成

功探测到了同时产生的一对参量光子.图 4(b)是考虑探测器只是对先后到达的两个光子中的某一个作出了反应,只输出了一个负脉冲信号,于是放大鉴别器只输出一个标准 NIM 信号的情况.对于第一条支路,计数器计数 $N_A = 1$,表征探测器探测到一个光子.对于第三支路,在其中传输的 NIM 信号相对第二支路中传输的 NIM 信号在时间上有 $\Delta\tau$ 的滞后,于是如图 4 中所示,两条电路上没有在时间上同时出现的脉冲,符合电路不会输出 NIM 信号,计数器 B 计数不变, $N_C = 0$,表征探测器没有探测到同时产生的一对光子的全部(只探测到其中的一个光子).如果探测器对先后到达的两个光子都没有响应,计数器 A 不会计数,计数器 B 当然也不计数.

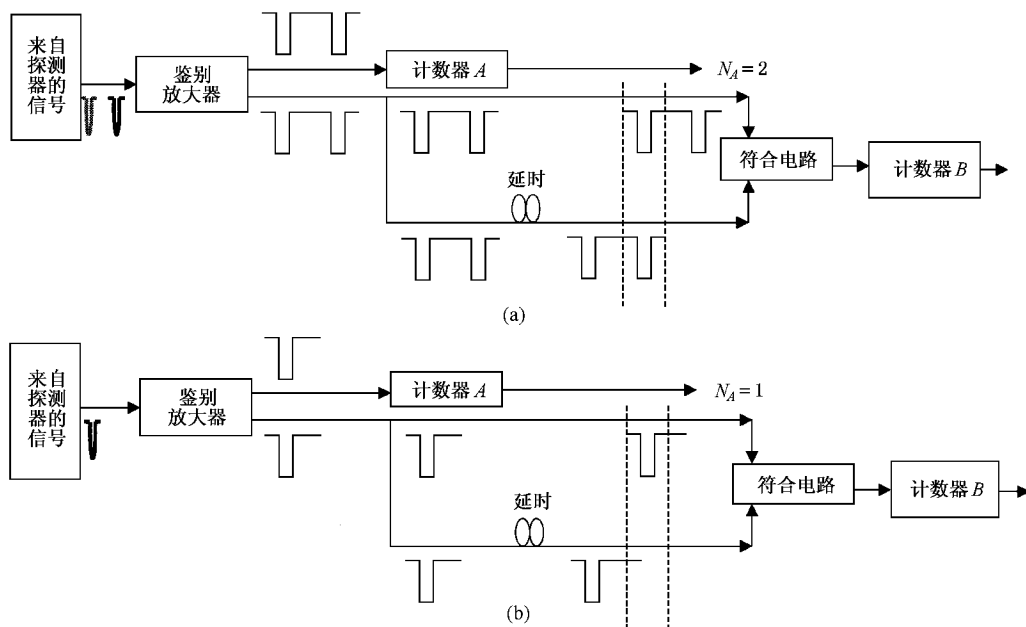


图 4 连续激光抽运方案的电路实现部分

综合这三种情况,设在某一时间段内参量下转换过程产生的光子对数为 N ,这一段时间内计数器 A 的计数为

$$N_A = 2N \cdot \eta, \quad (4)$$

计数器 B 的计数为

$$N_C = N \cdot \eta \cdot \eta, \quad (5)$$

于是可以得到探测器的量子效率

$$\eta = 2N_C / N_A. \quad (6)$$

这样就实现了一个典型的单光子探测器的量子效率的自绝对标定过程.

我们还给出了基于高重复频率脉冲激光器抽运的实验方案,参见图 5.根据脉冲激光器的时钟同步

脉冲信号使用符合测量技术,可以分别将探测器所探测到的先后到达探测器的光子数测出,例如在图 5 中是将经过延时的 o 光光子的计数率测出

$$N_1 = N\eta, \quad (7)$$

计数器 C 同样得到延时与不延时光子间的符合计数

$$N_C = N \cdot \eta \cdot \eta, \quad (8)$$

于是得到探测器的量子效率

$$\eta = N_C / N_1. \quad (9)$$

基于高重复频率脉冲激光器的方案还有更多可以扩展的内容,比如可以同时实现对一个探测器在两个不同波长处的量子效率的绝对标定.

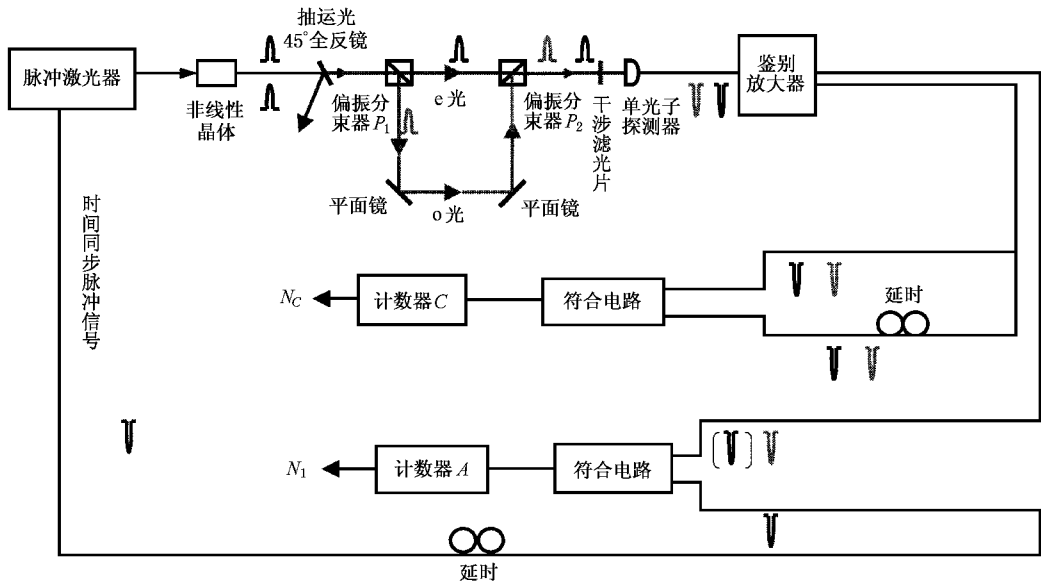


图 5 脉冲激光抽运方案

由于参量下转换产生纠缠光子对的技术已经相当成熟,而符合测量技术也是科学实验中一个成熟的手段^[7],所以我们的方案是可行的.相比于现在在

国外已经实用化的基于两个探测器的绝对标定方案,我们的方案更简便,适合于更普遍的环境.

- [1] Klyshko D N 1980 *Sov. J. Quantum Electron.*, B **10** 1112
- [2] Kwiat P G, Steinberg A M, Chiao R Y *et al* 1994 *Applied Optics* B **33** 1844
- [3] Rarity J H, Ridley K D and Tapster P R 1987 *Applied Optics* B **26** 916
- [4] Brida G, Castelletto S, Noviero C and Rastello M L 1999 *J. Opt. Soc. Am B* **16** 1623

- [5] Migdall A 1999 *Physics Today* (Jan 1999) 41
- [6] Czitzrovszky A, Sergienko A, Jani P and Nagy A 2000 *Metrologia* B **37** 617
- [7] Ma H Q, Fu D H, Feng K F, Yao D C and Wu L A 2003 *Physics* **32** (in Chinese) [马海强、符东浩、冯凯峰、姚德成、吴令安 2003 *物理* **32**]

Absolute self-calibration of the quantum efficiency of single-photon detectors^{*}

Chang Jun-Tao Wu Ling-An

(*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(Received 30 September 2002; revised manuscript received 19 October 2002)

Abstract

An absolute self-calibration method is proposed for determining the quantum efficiency of a single photon detector which does not require any standard reference or a second detector. The method is based on the time correlation of photon pairs generated in parametric downconversion. A beam of frequency downconverted photons is split at a polarizing beamsplitter then recombined at a second beamsplitter, but with a time delay introduced between them so that the two photons of an original pair enter the detector one by one. The photoelectric pulses from the detector are split into three paths; a compensating delay is introduced into two of the paths so that the two signals arrive simultaneously at a coincidence counter; the third path goes directly to a photon counter. From the ratio of the readings of the two counters we can derive the quantum efficiency of the detector. Two methods are given, one for continuous wave lasers and another for high repetition rate pulsed lasers.

Keywords : self-calibration, quantum efficiency, single photon detector, coincidence counter, parametric downconversion

PACC : 0620H, 4250, 2970, 2970F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19974073 and 60178013), the National Fundamental Research Program (Grant No. 2001CB309300), the Chinese Academy of Sciences and the Joint Laboratory of Advanced Technology in Measurements.