

文章编号 1004-924X(2011)05-1005-08

相关光子符合计数的实现及修正

吕亮^{1,2*}, 林延东²

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100086;
2. 中国计量科学研究院 光学所, 北京 100013)

摘要: 为了实现利用非线性晶体自发参量下转换(SPDC)产生的相关光子测量光电探测器量子效率, 对相关光子符合计数装置的设计及符合计数方法的系统修正进行了研究。介绍了 SPDC 相关光子的产生机理以及利用其进行光电探测器量子效率测量的原理。设计了两种不同的符合计数装置, “门控双通道光子符合计数装置”和“基于 TAC/MCA 的符合计数装置”。分析了两种计数装置符合结果的偶然符合、丢失符合、符合器死时间、探测器死时间等误差, 并分别给出了修正因子及修正因子的计算和测量方法。结果表明: 修正后两种方法量子效率测量结果的一致性 $<0.4\%$, 均能满足量子效率符合测量的需要, 提出的修正方法也具有很好的可操作性。

关键词: 自发参量下转换; 相关光子; 量子效率; 符合计数

中图分类号: TP211.6; TH724 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111905.1005

Realization and correction of coincidence counting setup used in correlated photon detection

LÜ Liang^{1,2}, LIN Yan-dong²

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100086, China;
2. Optic Division, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

* Corresponding author, E-mail: lvliang@nim.ac.cn

Abstract: With the aim to realize Quantum Efficiency(QE) measurement of photon detectors based on Spontaneous Parametric Down-conversion(SPDC), two type of coincidence count systems were set up, the correction factors of coincidence count were analyzed and the real experimental methods of correction factors were given. Firstly, the principle of SPDC and the technique using SPDC to calibrate the QE of photo detectors were introduced. Then the design of two type of coincidence count systems, gated dual-photon counter coincidence count system and TAC/MCA coincidence count system, were introduced. Finally, the main correction factors, accidental coincidence, missing coincidence, dead time of counters and detectors were analyzed, and the calculation and test methods were also given. Experimental results show that the deviation between this two type of coincidence setups is less than 0.4% after correction, which indicates that the two setups can satisfy the requirement of QE measurement.

Key words: Spontaneous Parametric Down-conversion(SPDC); correlated photon; quantum-efficiency; coincidence count

收稿日期: 2010-10-27; 修订日期: 2010-12-10.

基金项目: 国家科技部科技支撑项目(No. 2006BAF06B05)

1 引言

自发参量下转换 (Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) 是由非线性晶体内泵浦光和量子真空噪声的综合作用产生的, 每一个入射到晶体内的光子以一定概率自发地分裂为能量较低的两个光子, 这两个光子在时间和空间上具有高度的相关性, 所以这两个光子又称相关光子或纠缠光子。SPDC 过程产生了从泵浦光频率到晶体晶格共振频率的宽光谱光场^[1-3]。

SPDC 技术已经直接应用于可调谐激光器 (如 OPO)、量子密钥等领域^[4-5], 但将其作为光学计量领域中绝对测量光电探测器量子效率的新方法是在 20 世纪 80 年代初期由前苏联 D. N. Klyshko 教授提出的, 近 10 年来已有一些发达国家建立了此类测量装置。如 2007 年欧洲国家的计量机构联合体 (EMRP) 启动了用光子数重新定义 7 个 SI 国际单位之一——“坎德拉”的“量子坎德拉工程”, 并已经向国际计量局提出其方案。该方案内容是将 1979 年的坎德拉定义改为“坎德拉是在给定方向上, 频率为 540×10^{12} Hz 的单色光源发出 4.092×10^{15} 光子数/s/立体角的光源发光强度”^[6]。此定义由原来的功率 (W) 定义改为光子个数定义, 从而过渡到了量子定义的范畴, 这种定义的物理意义更加明确, 符合当代计量学采用量子基准的方向。

“量子坎德拉工程”中重要的一个环节就是基于 SPDC 方法高精度测量光电探测器的量子效率, 而这种方法利用的是下转换光子对的空间时间相关性, 具体实现采用的是符合计数方法, 由符合计数与一路光子单独计数来得到该路探测器量子效率。因此, 符合计数方法及其影响因子的修正直接影响到量子效率的测量结果。本文在介绍量子效率测量原理的基础上重点对符合测量部分实现方法进行讨论, 并给出了不同符合方法的系统修正因子。

2 纠缠光子法测量量子效率原理

2.1 SPDC 的产生及特性

SPDC 光场是由于泵浦光和量子真空噪声的

综合作用产生的。量子真空噪声 (零点辐射场) 与原子的相互作用产生了自发辐射, 频率为 ω_p 的强泵浦光与频率为 ω_s 的自发辐射光子在非线性晶体中进行混频, 通过差频过程使低频弱光信号得到放大, 并同时伴生一较低频率 ($\omega_i = \omega_p - \omega_s$) 的光辐射, 由此形成了 SPDC 双光子场。因此, 产生 SPDC 光场的过程可以理解为自发辐射的参量放大过程^[5]。在满足相位匹配条件 $k_p = k_i + k_s$ 的 k_s 和 k_i 方向上, 频率为 ω_s 和 ω_i 的光辐射最强, 整个光场的空间分布取决于晶体光轴与泵浦波方向的夹角。由于自发辐射为连续谱分布, 所以 SPDC 光场为频率低于泵浦光频率的连续宽谱分布^[7]。

下转换产生的频率为 ω_s 和 ω_i 的两个光子为了有所区别一般被称为信号光子 (signal) 和闲置光子 (idler), 并且只是名称上的区分 (如图 1 所示)。利用量子力学中 Heisenberg 运动方程推导双光子产生速率不仅能解释 SPDC 产生机理, 更重要的是可以得到 SPDC 纠缠光子的如下特性:

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

$$k_p = k_i + k_s, \quad (2)$$

其中式 (1) 代表能量守恒, 由此可以得到如下关系:

$$1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_i, \quad (3)$$

式 (3) 中 $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$ 分别代表泵浦光, 信号光, 闲置光的波长。可以看出在下转换光场中确定了一个光子的波长后其孪生光子的波长可由式 (3) 计算得到。

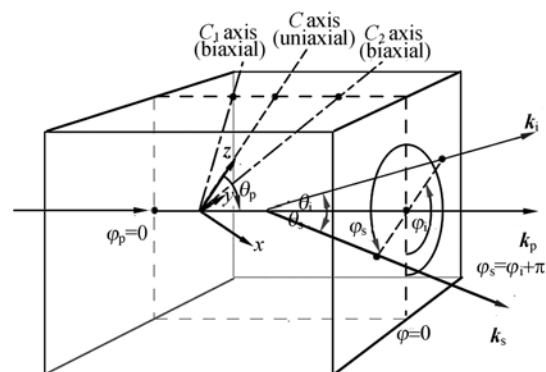


图 1 SPDC 双光子产生示意图

Fig. 1 Block diagram of SPDC process

式(2)代表动量守恒关系,在满足 Type-I 类相位匹配的条件下,可得到如下关系:

$$\frac{n_p^{(e)}}{\lambda_p} = \frac{n_p^{(o)} \cos \theta_s}{\lambda_s} + \frac{n_p^{(o)} \cos \theta_i}{\lambda_i}, \quad (4)$$

$$\frac{n_p^{(o)} \sin \theta_s}{\lambda_s} + \frac{n_p^{(o)} \sin \theta_i}{\lambda_i} = 0, \quad (5)$$

其中 $n_p^{(e)}, n_p^{(o)}$ 分别为泵浦光两个偏振分量在非线性和晶体中的折射率; θ_s, θ_i 为下转换的两个光子在晶体内传播方向与泵浦光夹角。

从式(3),(4),(5)中可以得到,如果在某一个方向上探测到一个光子存在,那么在其共轭方向上就存在另一个孪生光子,并且这个光子的波长及传播方向可以被唯一确定^[8]。

2.2 光电探测器量子效率的测量

图 2 所示为利用 SPDC 过程产生的相关光子对绝对测量光子探测器量子效率的装置原理图。由 351.1 nm 氩离子连续激光器作为泵浦光,抽运非线性晶体。晶体类型为 BBO(Type-I 类相位匹配,切割角度 38.1°)。晶体前采用了半波片,用于旋转泵浦光偏振方向,以便破坏 SPDC 产生需要相位匹配条件,关断下转换从而测量暗计数。装置中分别用两个高灵敏度光子探测器对下转换产生的信号光和闲置光进行探测,采用光子计数模式。光子探测器为光电倍增管(PMT,日本滨松)。PMT 信号经过 5 倍放大后由后续符合及单路计数单元采集(详细组成在后面着重介绍),并且在两个 PMT 窗口前端安装了测量波长点对应的窄带滤光片,用于屏蔽杂散光。

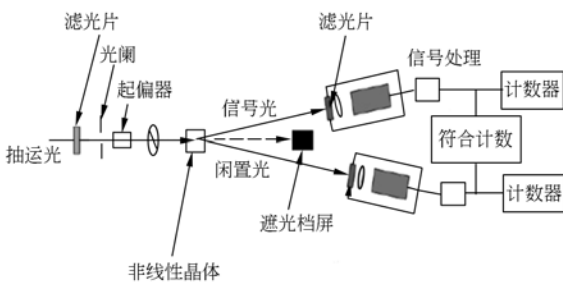


图 2 基于 SPDC 的光电探测器量子效率测量装置原理图
Fig. 2 Block diagram of measurement setup for quantum efficiency of photon detector based on SPDC

设 N 为给定时间内晶体中产生的相关光子对的总数, N_s, N_i 分别为信号光、闲置光两个通

道的光子计数值, N_c 为符合计数值。 η_s, η_i 分别为信号光、闲置光两个通道光子探测器的量子效率,由此有如下关系^[9]:

$$N_s = \eta_s \cdot N; N_i = \eta_i \cdot N; N_c = \eta_s \cdot \eta_i \cdot N. \quad (6)$$

在不考虑光学元件透射比等因素的条件下,光子探测器的量子效率计算如下:

$$\eta_s = N_c / N_i; \eta_i = N_c / N_s. \quad (7)$$

从以上原理可以看出,装置中未知数据的两个光子探测器,不依赖常规光辐射计量标准中使用的标准灯或标准探测器即可得到其量子效率,属于“无标准”量值复现新方法。

3 符合计数装置的设计实现

符合测量技术在核物理探测领域中有广泛的应用,两个或两个以上同时发生的事件称为符合事件^[10]。相关光子符合计数就是利用符合装置来记录两个纠缠光子同时发生的次数或概率。在测量探测器量子效率装置的研究过程中,分别使用和设计了两种不同的方法和装置来实现符合计数。

3.1 门控双通道光子符合计数装置

按照“符合”的定义,最直接的符合测量系统从原理上可以用“与”门来实现,只有当两个事件同时发生时门输出才为“1”。那么两路光子探测器的信号可以接入高速“与”门电路,门电路输出可用计数器得到符合计数,也就是两个光子同时发生的计数。

基于以上原理并考虑到电路或仪器的通用性和可靠性,采用了一种商用双通道光子计数器(型号 SR400)来实现“与”门的功能。图 3 为利用 SR400 实现符合计数的原理图。

SR400 型双通道光子计数器带宽为 300 MHz,拥有两个完全相同的计数通道,内置甄别器、10 MHz 时钟,并且每个甄别器都有快速 NIM 信号模拟输出。对于符合测量来说,两个计数通道均有门控模式和连续模式;当某一通道设为门控模式后,同时可以设置“门”开的时间宽度(最小

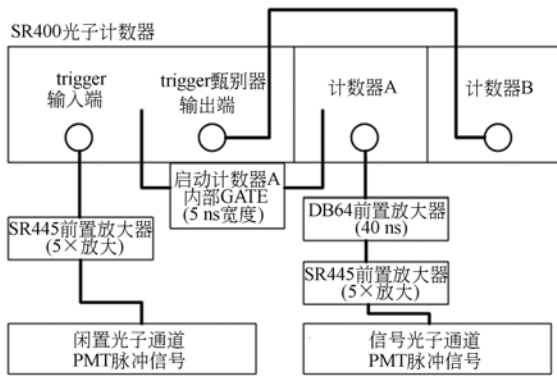


图 3 采用双通道门控光子计数器的符合计数原理图

Fig. 3 Coincidence counter using gated dual-photon counter

5 ns, 1 ns 精度) 以及“门”开相对于 trigger 的延时(1 ns 精度)。当 trigger 输入端有信号, 那么该通道“门”打开设定的时间宽度, 此宽度的时间内才能计数, 其它时间不计数。

由于前置放大器可以改善系统信号后续传输的抗噪声特性, 而且可以使光子计数甄别单元设置更高的鉴别阈值, 起到了改善定时特性和阈值稳定性的作用; 同时前置放大器在信号过大或异常状态下饱和, 可以保护后续昂贵的甄别和计数系统免受大信号或高压的冲击, 所以两路光子探测器信号都经过 SR445 型前置放大器(带宽 350 MHz)进行了电压放大。另外, 通过从小到大设置不同的甄别阈值进行光电倍增管原始脉冲幅度分析, 得到 90% 的脉冲幅度高于 45 mV, 所以使用 SR445 的最小放大倍数(5 倍)即可使得信号脉冲幅度处于甄别单元有效的电平设置范围(± 300 mV)内。

闲置光子信号直接作为触发信号, 其经过内部甄别后接入 B 通道计数(设置为连续计数模式), 计数结果为单通道计数值(N_i); 另一路的信号由光子探测器放大输出经过 DB64 型延时器(电缆延迟)延时 40 ns 后(用于补偿仪器固有的从触发到“门”开 25 ns 延迟以及电缆延迟)接入 A 通道计数器(设置为门控模式, 门宽为 5 ns), 此时如果 trigger 端有一个光子信号, A 通道“门”开 5 ns, 在这 5 ns 时间内如果 A 通道有计数则认为符合一次, 最终 A 通道的计数值为符合结果(N_c)。由此信号光子通道探测器的量子效率(η_c)可由式(7)计算得到, 同理交换两个通道的信号通

过信号光子通道的单通道计数值(N_s)及符合计数值又可得到闲置光子通道探测器的量子效率(η_i)。

在此装置上通过设置“门”开相对与触发信号的延时, 进行符合宽度的实际实验测量, 但是没有考虑光学器件透射比等修正因素, 仅为符合测量功能的验证。图 4 曲线为实际测量符合宽度及仪器内部“门”开延时位置的数据, 延时扫描步进为 1 ns。从图中可以看出, 符合宽度为 5 ns, 与设置值完全吻合, 而且符合中心在 15 ns 位置。同时仪器内部固有的触发门开延时为 25 ns, 与这个 15 ns 延时之和为 40 ns, 与 DB64 延时设置吻合, 证明了此装置符合功能的可行性。

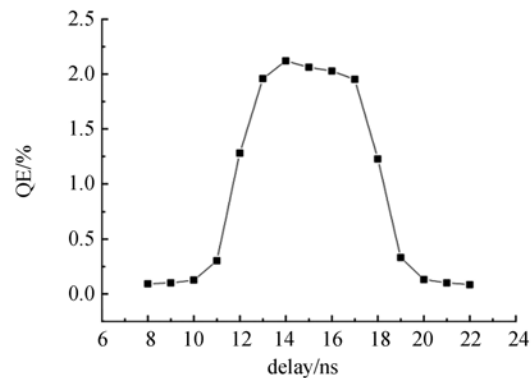


图 4 通过延时扫描实测符合宽度结果

Fig. 4 Coincidence width data by delay scanning

3.2 基于 TAC 和 MCA 的符合测量装置

最常用的符合测量方法是采用时间-幅度变换器(Time-to-amplitude Converter, TAC)以及多道分析仪(Multi-channel Analyzer, MCA)组合来获取双光子符合时间谱。

实验中采用美国 Ortec 公司核物理分析设备搭建了 TAC/MCA 系统。从两路光电倍增管输出的信号经过 SR445 放大 5 倍, 首先通过两个 583 型甄别器, 对两路信号进行脉冲甄别; 甄别后的两路信号直接输入至 994 型双通道计数器, 记录两路信号各自的计数率; 进而其中一路经过 DB64 型 ns 延时器, 方便进行两路信号的符合和时间信号的调节; 同时两路信号又分别作为起始和终止信号输入至 566 型 TAC, TAC 输出至 926 型 MCA 多道分析器, 完成符合计数的时间谱图。装置原理如图 5 所示:

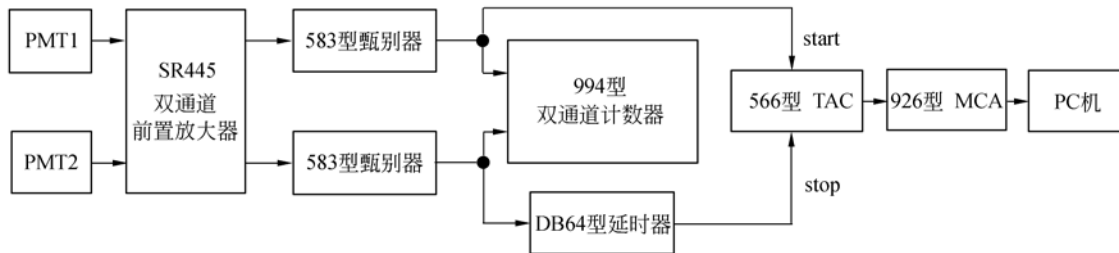


图 5 TAC/MCA 单路计数及符合计数装置

Fig. 5 Single counter and coincidence counter based on TAC/MCA

至此由 994 双通道计数器可以分别得到信号光子和符合光子各自的计数率,同时由 MCA 记录 TAC“start”及“stop”信号的时间宽度图谱,由计算机分析得到符合峰,并通过设置符合宽度得到符合计数率。

进行了一次 400 s 符合采集实验,得到了如图 6 所示的图谱。

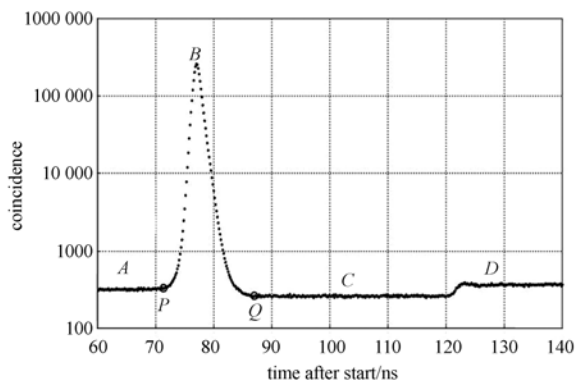


图 6 MCA 实测符合计数曲线

Fig. 6 Coincidence curve using MCA setup

图 6 曲线中 P 点到 Q 点区域值总和就是符合计数,符合峰半宽约 5 ns,与 3.1 中方法一致。从中可以看出,采用 TAC/MCA 系统的装置信息量比门控计数器装置的信息量更大,一次测量可得到符合计数和偶然符合计数(曲线平坦区域)。

4 两种符合测量方法的修正分析

在整个量子效率测量系统中,测量结果的修正主要分为器件透过率修正及符合计数修正,数据正确全面修正是此项技术的关键。

基于第 3 节中的两种测量装置,这里首先假设两个相关光子其一作为触发探测器(trigger),另一个作为被测探测器(DUT)。触发通道计数

值记为 N_t ,触发通道暗计数记为 N_d ,两个光子符合计数记为 N_c ,被测探测器量子效率记为 η_{DUT} ,被测通道光学总透过率记为 T_{DUT} 。那么式(7)关于量子效率的计算可变为式^[11-12](8):

$$\eta_{DUT} = \frac{1}{T_{DUT}} \cdot \frac{N_c}{N_t - N_d}, \quad (8)$$

式(8)已经包含常规量的修正,但是尚没包含符合测量中引入的系统偏差,以下分项分析符合计数中的关键修正量及其计算、测量方法。

4.1 偶然符合修正

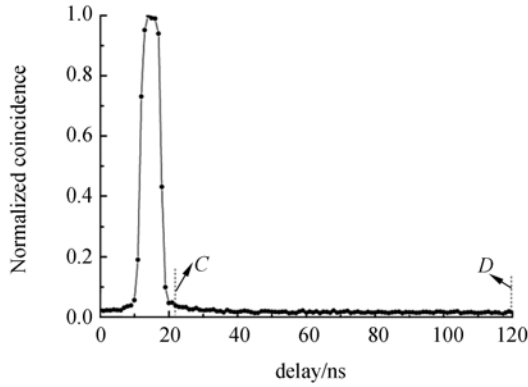
符合计数的结果包含两个部分:真符合和偶然符合,这两个概念源自核物理活度测量领域^[13]。但在相关光子探测方面,真符合来自两个相关光子同时到达符合窗口的事件,而偶然符合来自两个不相关的随机光子正好落在符合窗口内的事件。

对于采用“与”门原理的基于 Gate 双通道计数符合装置,需要在每轮符合测量结束后保证光辐射条件不变的情况下进行专门的偶然符合测量。测量方法是使得 DUT 端信号从符合窗口位置延迟更多的时间,完全避开符合位置然后进行符合计数,结果即为偶然符合计数值。

对于 TAC/MCA 系统实际上也采用同样的方法,但此种方法的测量数据信息量大,比如在图 6 中在符合峰之外的平坦区域选取与符合计算同样宽度的窗口进行单道分析即可得到符合计数值。

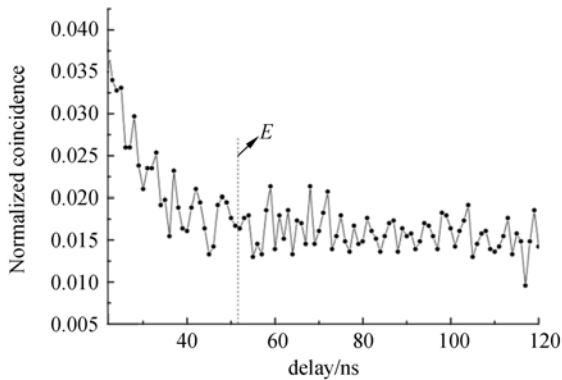
图 7 是通过门控双通道光子符合计数装置对偶然符合测量点选择的实验结果。

从图 7(b)放大的局部图中可以看出,在接近符合峰位置区域(E 点左侧),符合值还是与远离符合峰区域(E 点右侧)有明显区别,原因是尚有真符合的存在,因此选择偶然符合测量点时最好还是将延时向后大范围离开符合区域为宜。实际



(a) (0~120)ns 延时符合测量结果, 延时扫描间隔 1 ns

(a) (0~120)ns range coincidence with different delays and delay scan interval in 1 ns



(b) 图(a)中 C 点至 D 点区域局部放大

(b) Magnified curve of C to D region in picture (a)

图 7 门控双通道光子符合计数装置偶然符合的测量结果
Fig. 7 Accidental coincidence measurement on setup using gated dual-photon counter

实验中选择 100 ns 延时后再测量偶然符合计数。

如果将偶然符合计数记为 N_a , 那么式(8)变为式(9), 为

$$\eta_{\text{DUT}} = \frac{1}{T_{\text{DUT}}} \cdot \frac{N_c - N_a}{N_t - N_d} \quad (9)$$

4.2 符合丢失修正

对于 TAC/MCA 装置中必须考虑真符合丢失的问题。此装置中通过 trigger 通道接入 TAC 的 start 端, DUT 通道经过延时 τ_d 后接入 TAC 的 stop 端, 然后 TAC 将所有 start-stop 的时间间隔变换为电压信号后接入多道分析仪 MCA 中, 记录不同时间间隔时间的分布。因此如果 DUT 经过 τ_d 延时后, 真符合会在 MCA 所记录曲线中的时刻位置产生符合峰。

当 trigger 端有一个光子信号进入 TAC 的 start 端, 但在 t 时刻 ($t < \tau_d$) 另一个真正的相关光子没有到达 TAC 的 stop 端之前就有一个非相关的光子将 TAC 的 stop 端触发了, 这时真正的相关光子信号被丢失, 导致符合丢失一次。

对于丢失的符合计数比例因子 α 可以用公式(10)表示^[14]:

$$\alpha = \exp\left[-\int_0^{\tau_d} P_{\text{DUT}}(t') dt'\right] \cong 1 - N_{\text{DUT}} \cdot \frac{\tau_d}{W} \quad (10)$$

其中 $P_{\text{DUT}}(t')$ 是 DUT 通道的计数率; N_{DUT} 是在 W 时间段内 DUT 通道的光子计数值。

从式(10)中可以看到, DUT 通道计数率越高或延时越长丢失的符合计数越多。

但是对于采用“与”门原理的基于 Gate 双通道计数符合装置不存在此问题, 因此 $\alpha=1$ 。

4.3 符合装置死时间修正

计数测量系统处理一个脉冲信号后, 恢复到能处理下一个脉冲信号所需的时间称为死时间。

对于 TAC/MCA 符合装置, 死时间修正尤为重要。因为在 TAC 接收到 start 触发信号后的死时间内系统处于 busy 状态, 无法接受和处理后续信号。但与此同时双通道计数器还在继续计数, 这样就导致了在触发端有过高的计数, 需要如下修正因子:

$$\beta = 1 - N_{\text{trigger}} \cdot \frac{\tau_d + t_{\text{dead}}}{W} \quad (11)$$

其中 N_{trigger} 为 W 时间段内触发端的计数值, τ_d 为 DUT 通道相对于触发通道的延时, t_{dead} 为符合装置的死时间(内部转换时间)。

对于采用“与”门原理的基于 Gate 双通道计数符合装置虽然其甄别器也存在 5 ns 的响应时间, 但两个通道的甄别电路完全相同, 具有近似相同的死时间, 所以不存在此问题, 因此 $\beta=1$ 。

4.4 探测器死时间修正

光电倍增管输出的脉冲有一定的宽度 t_w , 只有在从一个光电子脉冲产生时算起, 经过比 t_w 更长的时间间隔之后, 光电倍增管阳极回路才能接着输出另一个光电子脉冲, t_w 又称为光电倍增管的分辨时间。当后续光电子脉冲与前一个脉冲的时间间隔小于 t_w 时, 阳极回路只输出一个脉冲,

这种现象称为脉冲堆积效应。如果接连有很多脉冲来临前的时间间隔都小于 t_w , 这些脉冲都不能分辨, 因此光电倍增管也具有死时间。

两套符合计数装置中的 trigger 通道由于探测器死时间问题导致的丢失光子数量并不会影响最终结果, 因为丢失后, DUT 通道的相关光子也没有被记录。但是 DUT 通道则需要考虑这个问题, 用式(12)中的因子来修正。

$$\gamma = 1 - N_{\text{DUT}} \cdot \frac{t_{\text{dead-PMT}}}{W}, \quad (12)$$

其中 N_{DUT} 为 W 时间段内 DUT 通道的单路计数值, $t_{\text{dead-PMT}}$ 为 PMT 探测器死时间。

综合考虑 4.1~4.4 中所有的修正因子后, 量子效率公式(9)变为:

$$\eta_{\text{DUT}} = \frac{1}{T_{\text{DUT}}} \cdot \frac{N_c - N_a}{N_t - N_d} \cdot \frac{\beta}{\alpha \cdot \gamma}. \quad (13)$$

文中对两套装置的修正因子进行了实测及计算, 两种方法采集时间均为 400 s, 结果如表 1 所示:

表 1 两种装置符合修正系数对比

Tab. 1 Comparison of correction factors of two coincidence setups

修正因子	门控双通道光子符合	TAC/MCA
α	1	0.985
β	1	0.997
γ	1	1
修正后量子效率测量结果	0.048 06 ± 0.004	0.048 22 ± 0.003

参考文献:

- [1] KLYSHKO D N. *Photons and Nonlinear Optics* [M]. New York: Gordon and Breach, 1988.
- [2] BURNHAM D C, WEINBERG D L. Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs[J]. *Phys. Rev. Lett.*, June 1970, (25):84-87.
- [3] KLYSHKO D N. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors[J]. *Sov. J. Quant. Elect.*, Sept. 1980, (10):1112-1120.
- [4] 李敏, 范鲜红, 尼启良, 等. 微通道板在 12~40 nm 波段量子效率的实验研究[J]. *光学精密工程*,

5 结 论

本文介绍了 SPDC 相关光子的产生机理及其在测量光电探测器量子效率中的应用。设计实现了两种装置, 满足相关光子符合测量这一关键环节的需要。最后, 分析了不同符合装置符合计数结果的各关键修正量以及修正系数的计算和测量方法。

实验证明了两种符合装置都能满足相关光子符合计数的要求, 其中第一种装置的测量结果修正量少, 而第二种装置优势在于一次实验信息量大, 对光源强度稳定性要求小。

两种装置的量子效率测量结果仍然有约 0.4% 的偏差, 问题源于采用门控计数符合装置的实验过程需要对总符合、偶然符合、暗计数分 3 次测量, 每次有 400 s 计数时间, 而泵浦激光功率的长时间漂移和波动会导致 3 次测量实际的光子计数率不同而产生偏差, 此结果正好体现了 TAC/MCA 装置的优势。作者有意通过采用激光功率稳定器将泵浦光功率波动控制在小于 0.08% 的水平上来解决此问题。而基于 TAC/MCA 的符合装置中修正因子对测量结果的影响可通过修改符合装置来避免, 可尝试将记录两个通道各自计数双通道计数器与 TAC 的 trigger 同步, 使得每一个 trigger 信号都是有效的, 防止 TAC 死时间内双通道计数器仍然在不停的计数。

2008, 16(1):1-5.

LI M, FAN X H, NI Q L, *et al.*. Quantum efficiency of microchannel plate in 12~40 nm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):1-5. (in Chinese)

- [5] 吴斌, 王庆康. 带反射回馈的高效光子晶体多路滤波器件[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8):1208-1214.

WU B, WANG Q K. Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters with reflection feedback[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1208-1214. (in Chinese)

- [6] CHEUNG J Y, CHUNNILALL C J, WOOLLIAMS E R. The quantum candela: a re-definition

- of the standard units for optical radiation [J]. *January 2007, Journal of Modern Optics*, 54(2-3): 373-396.
- [7] MIGDALL A. Correlated-photon metrology without absolute standards[J]. *Phys. Today*, 1999, (52): 41-46.
- [8] MIGDALL A. Absolute quantum efficiency measurements using correlated photons: toward a measurement protocol[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2001, (50):478-481.
- [9] 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 J Q. *Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology*[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
- [10] KWIAT P G, STEINBERG A M, CHIAO R Y. Absolute efficiency and time-response measurement of single-photon detectors[J]. *Appl. Opt.*, 1994, (33):1844-1853.
- [11] 王芝英. 核电子技术原理[M]. 北京:原子能出版社,1989.
WANG ZH Y. *Principles of Nuclear Electronic Technology*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1989. (in Chinese)
- [12] BRIDA G, CASTELLETTO S, NOVERO C. Measurement of quantum efficiency of photodetectors by parametric fluorescence[J]. *Metrologia*, 1998, (35): 397-401.
- [13] 周志成. 核电子学基础[M]. 北京:原子能出版社, 1980.
ZHOU ZH CH. *Fundamentals of Nuclear Electronic Technology*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1980. (in Chinese)
- [14] DAVIDSON F. Measurements of photon correlations in a laser beam near threshold with time-to-amplitude converter techniques [J]. *September 10, 1969, Phys. Rev.*, (185): 446-453.

作者简介:



吕亮(1978—),男,山西昔阳人,博士研究生,助理研究员,2000年于北京理工大学光电工程系获得学士学位,2005年于中国计量科学研究院获得硕士学位,主要从事微弱光辐射计量、低温辐射计等方面的研究。E-mail: lvliang@nim.ac.cn



林延东(1964—),男,北京人,研究员,1986年于北京大学物理系获得学士学位,主要从事低温辐射计、光电探测器特性等计量学的研究。E-mail: linyd@nim.ac.cn

(本栏目编辑:严寒)