

基于偏振纠缠光子对的单光子源*

马海强^{1)†} 王素梅³⁾ 吴令安²⁾

1) 北京邮电大学理学院, 北京 100876)

2) 中国科学院物理研究所光物理开放实验室, 北京 100190)

3) 北京理工大学车辆与工程学院, 北京 100081)

(2008 年 4 月 7 日收到, 2008 年 8 月 1 日收到修改稿)

提出了一种基于参量下转换纠缠光子对获得单光子源的实验方案, 并对实验的光路、数据采集方面做了详细介绍. 实验结果显示, 由此方案获得的单光子源的品质要优于弱相干光式的单光子源两个数量级, 即多光子光脉冲出现的概率降低了 100 倍. 实验结果表明此方案有望得到实际应用.

关键词: 单光子源, 参量下转换, 反符合测量

PACC: 0365, 4230, 4250

1. 引 言

量子信息技术出现之后, 基于单光子编码需要一种新型的光子源的发展. 在这种光子源中光子的数目不仅能够人为控制, 更重要的是, 每次触发, 只有一个光子出射的单光子源. 尤其是最近几年量子通讯技术的快速发展, 单光子源的新设想和新实验也不断被提出. 在参量下转换的过程中产生的纠缠光子对中, 若有信号光子的出现, 就有与其共轭的闲置光子. 巧妙设计光路, 采用符合与反符合相结合的测量技术, 就能得到一种新型的单光子源.

世界上绝大部分实验室若想获得单光子就可简单地将一束激光脉冲衰减^[1,2], 使每个脉冲的平均光子数降到 0.1 个左右, 工作原理见图 1(a). 因为光子为波色子, 激光脉冲中的光子数分布属于泊松分布

$$P_m = \frac{\mu^m}{m!} e^{-\mu}, \quad (1)$$

上式表示光脉冲中含 m 个光子的概率, 其中 μ 表示每个脉冲中的平均光子数. 当 $\mu \ll 1$ 时, 含有两个光子或两个以上光子(简称为多光子)的脉冲出现的概率 $P_{m>1}$ 占全部含有光子的脉冲中出现的概率为

$$\frac{P_{m>1}}{1 - P_0} = \frac{1 - P_0 - P_1}{1 - P_0}$$

$$= \frac{1 - e^{-\mu}(1 + \mu)}{1 - e^{-\mu}} \approx \frac{\mu}{2}, \quad (2)$$

其中 P_0, P_1 分别为没有光子的脉冲及含有一个光子的脉冲出现的概率. 对于平均光子数为 $\mu = 0.1$ 的光脉冲串来说, 多光子脉冲在全部含有光子的脉冲中出现的概率约为 5%, 人们常把这种光源称为单光子源. 若想提高单光子源的品质, 就要减少光脉冲中的平均光子数, 但这样做的缺点是大大降低了单光子的产生速率.

苏联的 Klyshko^[3] 曾提出的用参量下转换所产生的双光子建立标准的光子发生器的设想和吴令安等^[4] 提出的单光子探测器量子效率自绝对标定方案, 均利用光子纠缠态中两路光场之间一一对应的关联性, 用接收信号光子的探测器输出的电脉冲信号作为光快门触发信号, 当且仅当在闲置光方向上的普通单光子探测器响应时, 才打开信号光路上的快门, 则通过光快门的信号光子就只能是单个光子. 根据这一原理, Hong 和 Mandel^[5] 利用单光子发生器实现了较理想的单光子态. 光路工作原理如图 1(b) 所示, 但因光脉冲中光子个数的泊松统计特性以及当前市场上的单光子计数器模块也不能分辨出光脉冲中含有的是一个光子还是多个光子, 这样就造成了很大的实验误差.

为解决第二种方案中的缺陷, Walton 等^[6] 提出

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB921100) 国家自然科学基金(批准号: 60578029, 10674174, 60578043) 和北京市教委共建项目(批准号: sk100130837) 资助的课题.

† E-mail: hqma@bupt.edu.cn

了基于探测器可分辨光子数的关联单光子源,即该探测器在响应一个光脉冲的到来时,能够分辨出光脉冲中含有的光子个数,当且仅当探测到的光脉冲中含有一个光子时,信号光路上的快门才打开,工作原理如图 1(c)所示.因为要求探测器能够分辨是一个光子还是多个光子到达探测器光敏表面,所以

该方法只能适用于量子效率较低的光电倍增管,不能应用于雪崩二极管(avalanche photodiode,简称 APD)式单光子探测器(而这种类型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^[7].

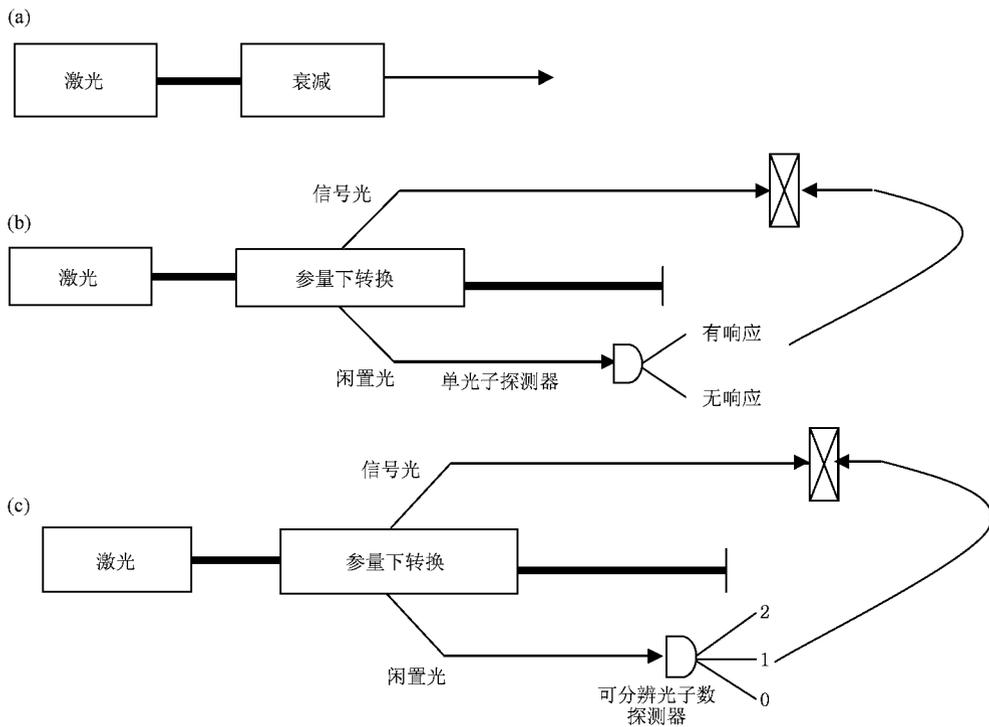


图 1 强衰减的单光子源获得方法 (a) 基于光子对关联性的单光子源 (b) 和基于探测器可分辨光子数的关联单光子源 (c)

当前比较引人注目的单光子源获得方案是量子点单光子发射器,在固体或者色心的量子点里,当光脉冲激发量子点时会产生一些电子空穴对,这些空穴对重新复合后可以产生特定波长的光子^[8-10].量子点单光子脉冲源可以发射带宽非常窄并且脉冲宽度更短的脉冲,对量子通信非常有利,然而由于其要求液氮温度环境工作,不适合室外操作,其效率也较低.

工艺已经逐渐趋于成熟,并且探测的波长范围也很宽,有工作在 400—1100 nm 的 Si-APD,以及工作在 900—1700 nm 的 InGaAs-APD.

本文提出的基于参量下转换纠缠光子对获得单光子源的实验方案,首先对实验方案做了说明,接着对实验所采用的光路、数据采集和处理做了详细介绍.实验结果表明,由此方案获得的单光子源的品质要大大优于弱相干光式的单光子源,即多光子光脉冲出现的概率减小了两个数量级.

我们实验方案的原理如图 2 所示.实验中在闲置光方向上添加了 50/50 分束器,利用了单光子路径随机选择特性,单光子只能从 50/50 分束器的一个端口输出,即若输进来的是单光子信号,只能走 50/50 分束器的上臂或者下臂,不能同时走两臂,两个单光子探测器不能同时探测到信号,因此采用反符

2. 实验方案

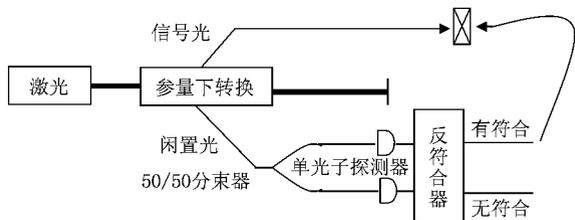


图 2 实验方案原理图

目前,基于雪崩二极管的单光子探测器的技术

合测量技术 , 当且仅当反符合器有响应时 , 就能够准确地判断出闲置光方向上过来的是单光子脉冲信号 . 根据闲置光、信号光的纠缠特性 , 此时刻打开信号光路上的快门 , 就可得到信号光的单光子脉冲 . 这样的原理设计 , 仅多用了个工艺最成熟的 Si-APD 雪崩光电二极管作为探测器 , 就可有效地降低多光子脉冲引起的误差 .

2.1 实验的光路部分

实验光路如图 3 所示 . 实验所用的泵浦光来自于连续的氦镉激光器 , 波长为 441.6 nm , 连续光功率为 100 mW . 为了增加光的功率密度 , 在泵浦光打入晶体前 , 先用聚焦透镜将光束会聚 , 通过 II 类参量下转换晶体 BBO , 产生波长简并 883.2 nm , 偏振纠缠的

光子对 , 即偏振方向相互垂直的信号光 (o 光) 和闲置光 (e 光) . 由于晶体的转换效率较低 , 从晶体的出射光中 , 除了信号光和闲置光外 , 还有大量的没有参与下转换的泵浦光 . 为了消除泵浦光的干扰 , 晶体后面加了两块 441.6 nm 的全反镜 . 由于信号光和闲置光的偏振纠缠特性 , 它们共处于一个双光子纠缠态中 . 只有确定了一个光子是 o 光 (e 光) , 才能判定另一个是 e 光 (o 光) 子的存在 , 因此在光路中放置一偏振分束棱镜 (PBS) , 经过 PBS 的透射光定义为信号光 , 那么反射光为闲置光 , 即有闲置光存在 , 肯定有信号光存在 . 将闲置光耦合进一普通的 50/50% 的 Y 型全光纤耦合器 , 单光子只能从 “ 0 ” 路或 “ 1 ” 路概率均等地选择其一 .

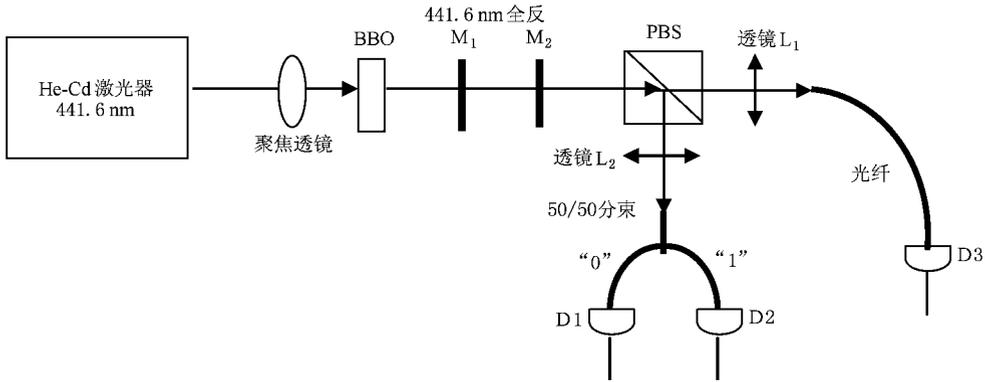


图 3 基于偏振纠缠光子对的单光子源的实验光路图 (BBO : II 类参量下转换晶体 ; PBS : 偏振分束棱镜 ; D1 , D2 , D3 : 单光子探测器)

2.2. 探测及数据采集部分

实验所用的数据采集如图 4 所示 . 单光子探测器 D1 , D2 为 Perkin Elmer 公司生产的 SPCM-AQR-12 型单光子探测器 . 由于 D1 , D2 的输出是 TTL 电平 , 为了使其与时间-幅度转换器 (EG&G Ortec 公司生产的 567 型) (TAC) , 逻辑符合器 Logic Uni (EG&G Ortec 公司生产的 CO4020 型) 的输入信号相匹配 , 在 D1 , D2 两探测器的输出信号后分别加了倒相盒 (RC 盒) , 倒相盒输出和探测器 D3 (基于 Perkin Elmer 公司生产的 C30902SQC-02 型硅雪崩二极管的自制无源抑制单光子探测器) 的输出分别接入鉴别放大器 (EG&G Ortec 公司生产的 1121A 型) , 作用是取出有用信号消除噪声 . 三个计数器分别用来定量观察每个探测器的响应次数 . 时幅转换仪的开始信号来自 D3 探测器的响应脉冲 , 即信号光子 . 探测器 D1 , D2 的响应作为结束信号 , 方法是将来自 D1 , D2 的信号用 T 型三通合二为一接入时幅转换仪的结束输入

端 . 时幅转换仪的输出为脉冲宽度固定 , 幅度随开始与结束信号的时间差变化而变化的方波 . 将此信号输入多道分析仪 (MCA) (北京核工业仪器厂制作) , 作用是将不同电压值显示在不同道址上 , 以此来定性观察单光子的路径随机选择特性 .

在数据采集方面 , 为了测得更多实验数据 , 得到一些定量的结果 , 采用了符合测量进行数据采集 . 相对于反符合数据采集 , 可以得到更多的中间数据 , 以便对实验加以佐证 . 将来自 D3 的信号用 T 型三通分成两路接入到符合逻辑单元的两个输入端 A , B ; 来自于 D1 , D2 探测器信号对应的接入到符合逻辑单元 A ' , B ' 输入端 . 在做符合之前 , 我们已经确保了来自 D1 , D2 , D3 的信号同时到达符合逻辑单元 , 时间精度可以精确到 0.8 ns 以内 , 相对于符合逻辑单元的符合时间窗口为 8 ns , 已经完全可以了 . 符合逻辑单元的输出 C , C ' 为 TTL 信号 , 接入到计算机的并行口 , 进行数据采集 .

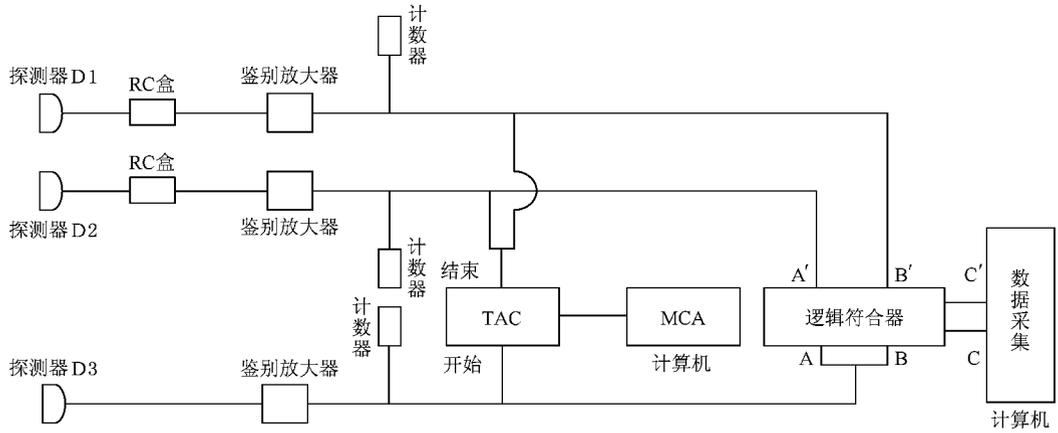


图 4 探测及数据采集原理图

2.3. 实验结果与讨论

在采集结果中,有四种情况出现,即① C, C' 都有输出,记为 11;② C, C' 都没有输出,记为 00;③ C 有输出, C' 没有输出,记为 10;④ C 没有输出, C' 有输出,记为 01. 对我们有用的只有①,③,④三种情况,在三个不同时间采集到的结果统计情况如表 1 所示.

表 1 11, 10, 01 出现次数统计结果

数据类型	第一组 计数	第二组 计数	第三组 计数
11	156	156	191
10	202155	268627	262385
01	182968	233201	242130
总计数	385279	501984	504076
11 所占比值	0.040%	0.031%	0.038%

可以看出,闲置光脉冲中非空脉冲含有两个光子以上出现的概率为

$$N_{11} / (N_{10} + N_{01} + N_{11}) \leq 0.04\%, \quad (3)$$

式中 N_{11} 表示 11 的计数, N_{10} 表示 10 的计数, N_{01} 表示 01 的计数. 从 (3) 式可以看出,多光子脉冲在非空脉冲中出现的概率小于 0.04%. N_{11} 主要来自于单光子探测器的暗计数和后脉冲. 通过 (2) 式我们知道,在弱相干单光子源中,在 $\mu = 0.1$ 的情况下,多光子脉冲在非空脉冲中出现的概率为 $\mu/2$, 即为 5%. 很容易看出由我们的方案得到的单光子源的性能要优于弱相干光式的单光子源两个数量级. 对后者而言,若是降低多光子脉冲出现的概率,只有减小 μ , 而付出的代价是大大降低了单光子的产生速率.

3. 结 论

基于偏振纠缠光子对获得单光子源的方法可以用连续激光替代衰减的激光脉冲作单光子光源,避免了由强衰减激光脉冲获得的单光子产生的速率要受到激光脉冲重复频率的限制以及多光子脉冲的干扰,因此原则上可以大大提高单光子产生速率和单光子的品质.

[1] Townsend P D, Rarity J G, Tapster P R 1993 *Electron. Lett.* **29** 634
 [2] Marand C, Townsend P D 1995 *Opt. Lett.* **20** 1695
 [3] Klyshko D N 1988 *Photons and Nonlinear Optics* (New York: Gordon and Breach)
 [4] Chang J, Wu L A 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1132 (in Chinese) [常君、吴令安 2003 物理学报 **52** 1132]
 [5] Hong C K, Mandel L 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 58

[6] Walton Z, Sergienko A V, Atature M, Saleh B E A, Teich M C 2001 *J. Modern Opt.* **48** 2055
 [7] Czitrovsky A, Sergienko A, Jani P, Nagy A 2000 *Metrologia* **37** 617
 [8] Waks E, Inoue K, Santori C, Fattal D, Vuckovic J, Solomon G S, Yamamoto Y 2002 *Nature* **420** 762
 [9] Yuan Z, Kardynal B E, Stevenson R M, Shields A J, Lobo C J, Cooper K, Beattie N S, Ritchie D A, Pepper M 2002 *Science*

295 102

Prawer S , Roch J F 2007 *New J. Phys.* **9** 434

[10] Wu E , Rabeau J R , Roger G , Treussart F , Zeng H , Grangier P ,

A single photon source based on entangled photon pairs^{*}

Ma Hai-Qiang^{1 2)†} Wang Su-Mei³⁾ Wu Ling-An²⁾¹ *School of Sciences , Beijing University of Posts and Telecommunications , Beijing 100876 , China)*² *Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China)*³ *School of Mechanical & Vehicular Engineering , Beijing Institute of Technology , Beijing 100081 , China)*

(Received 7 April 2008 ; revised manuscript received 1 August 2008)

Abstract

A single-photon source scheme based on entangled photon pairs from parametric down conversion is proposed , by means of which the single-photon quality is greatly improved , i. e. the multi-photon-pulse probability is reduced 100 times compared with that of an ordinary attenuated weak light source . The optical set-up and data acquisition are explained in detail . Experimental results show the good potential of this system for practical applications .

Keywords : single-photon source , spontaneous parametric-down conversion , anti-coincidence measurement

PACC : 0365 , 4230 , 4250

^{*}Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB921100) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60578029 , 10674174 and 60578043) and the Beijing Municipal Commission of Education , China (Grant No. sk100130837) .

[†] E-mail : hqma@bupt . edu . cn