

文章编号: 0253-2239(2004)03-294-5

# 基于马赫-曾德尔干涉仪的单个光子操控<sup>\*</sup>

熊 利 秦小林 冯明明 周春源 曾和平 良恩

(华东师范大学物理系 光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 分别利用空间和光纤马赫-曾德尔干涉仪对空间和光纤传输中的单个光子的干涉现象进行了研究, 干涉对比度可达到90%以上, 实现了空间和光纤中的单个光子的路由操控。实验采用脉冲调制加衰减的方法产生单个光子, 获得了每个脉冲中只包含0.1个光子的准单光子源。通过改变压电换能器的电压控制马赫-曾德尔干涉仪的单个光子在两个输出端的选择, 实现了光子在节点上的路由。采用同步符合检测技术, 利用重复频率为1 kHz, 脉冲宽度为100 ns的同步信号对输出信号进行符合, 实现了量子效率高于70%, 暗计数小于 $0.2\text{ s}^{-1}$ 的单光子高灵敏度检测, 观测到了单个光子在相位操控下出射到两个输出端的有序分配现象, 验证了基于马赫-曾德尔干涉仪的单个光子路由操控实现的可能性。

**关键词:** 量子信息; 单光子检测; 光子路由操控; 马赫-曾德尔干涉仪; 符合检测; 相位操控

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

## Single-Photon Control with Mach-Zehnder Interferometer

Xiong Li Qin Xiadin Feng Mingming Zhou Chunyuan

Zeng Heping Ding Liang'en

(Key Laboratory of Optics and Magnetic Resonance Spectroscopy, and Department of Physics,  
East China Normal University, Shanghai 200062)

(Received 24 April 2002; revised 10 March 2003)

**Abstract:** Research is done on the single-photon interference with two different Mach-Zehnder (M-Z) interferometers-particle and fiber separately. Achieving the high contrast above 90%, the experiment approves the routing control of single photon with Mach-Zehnder interferometers of particle and fiber successfully. Pulse-modulating and attenuating techniques are implemented to get the single photon, and the subsingle-photon source is achieved with only 0.1 photon in one pulse. The routing control of the single photon is under the control of the changing of PZT power. Furthermore, the synchronous single-photon coincidence detection technique is used to detect the single-photon, modulation with repeating frequency of 10 kHz and pulse FWHM of 100 ns, the high sensitive detection is improved with high quantum efficiency over 70% and the dark count below  $0.2\text{ s}^{-1}$ , single-photon output through the chosen path with given chosen PZT power has been observed. The experiment verifies that single \(\backslash|\) photon routing control can be achieved in Mach-Zehnder interference.

**Key words:** quantum information; single-photon detection; photon routing control; Mach-Zehnder interferometer; coincidence detection; phase control

## 1 引 言

<sup>\*</sup>上海市重点学科和国家重点基础研究发展规划(973)项目(001CB309301)资助课题。

E-mail: xiong1116@sina.com

收稿日期: 2002-04-24; 收到修改稿日期: 2003-03-10

现代量子信息技术中, 对单个光子在时域或频域的操控是量子信息编码、解码、光子路由选择、量子信息处理等方面的基础和关键单元技术。由量子

光学的基础理论可知, 单个光子在遇到 50% 分束界面时, 光子是透射还是反射表现出随机性。如图 1 所示当单个光子从 C 端入射, 通过一个 50% 分束界面后, 不能事先确定光子是经反射从 A 端出射, 还是经透射从 B 端出射。光纤分路器和空间光的分束传输都是这样。因此, 利用单个光子的这种特性还可以做成基于光量子特性的真随机源<sup>[1-9]</sup>。由于马赫-曾德尔干涉仪有两个出射口, 可利用光子的相干效应实现单个光子在空间及光纤传输上路由选择的操控, 这在量子信息处理方面有非常重要的应用价值<sup>[2-8]</sup>。

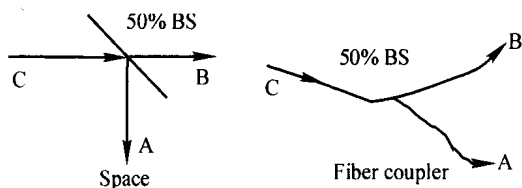


Fig. 1 Random path selection of a single photon on a beam splitter (BS)

本文主要报道基于马赫-曾德尔干涉仪的单个光子路由操控的实验结果。

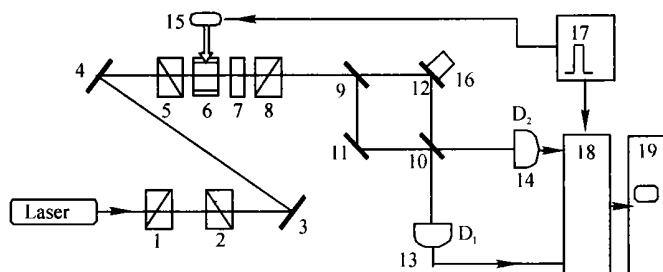


Fig. 2 Schematic of single-photon interference experiment. 1, 2, 5, 8: Glan lens; 6: EOM-PAM (electrooptic modulation-pulse amplitude modulator); 7: quarter-wave plate; 3, 4, 11, 12: mirror; 9, 10: beam splitter; 13(D1), 14(D2): APD; 15: EOM-PAM drive; 16: PZT; 17: control signal; 18: synchronous coincidence circuit; 19: photon counter

### 2.1.1 单个光子源的产生

严格意义上的单光子源是须满足在发射时间和空间均可操纵的单个光子源, 这种单光子源在目前仍是一项亟待解决的难题。

因此实验中采用了通用的脉冲调制与衰减结合的准单光子源方法。用  $\text{LiNbO}_3$  电光晶体 (6) 的脉冲幅度调制器 (EOM-PAM) 作为光开关, 电光晶体脉冲幅度调制器驱动源 (15) 的脉冲宽度和重复频率可调节; 同时用两组正交的格兰棱镜 (1, 2, 5, 8) 做光的衰减器; 为消除电光晶体所引入的自然双折射加入了一块  $1/4$  波片 (7)。一组格兰棱镜的消光比约为  $10^{-5}$ , 两组格兰棱镜组合的消光比可以达到  $10^{-9}$  以下。由于光路中的其他损耗如镜面的反射、吸收,

实验分别利用空间及光纤马赫-曾德尔干涉仪实现在空间及光纤传输中的单个光子路由选择的操控, 干涉对比度可以达到 90% 以上。

同时, 实验中采用比直接探测有更高信噪比的同步符合单光子检测技术实现对单个光子灵敏检测, 为利用马赫-曾德尔干涉仪实现单个光子的路由操控提供了可靠的实验方法。

## 2 空间单个光子路由选择操控

### 2.1 单个光子在马赫-曾德尔干涉仪中的干涉实验装置

基于马赫-曾德尔干涉仪的单个光子干涉实验系统如图 2 所示。实验系统设置了由 1、2、5、6、7、8、15、17 等组成的单个光子发射控制单元, 并将光子引入由 9、10、11、12 组成的马赫-曾德尔干涉仪; 通过改变压电换能器 (PZT) (16) 的驱动电压, 改变马赫-曾德尔干涉仪两路的相位差; 由雪崩光电二极管 (APD) 的单光子探测器 (13、14) 记录出射的光子行踪; 实验中采取同步符合计数 (17、18、19) 抑制噪声, 提取有效单个光子信号。

及光阑的挡光, 准单光子源光路的总衰减可达到 100 dB。

实验系统中所用的激光器为波长 780 nm 的半导体连续激光器, 输出功率为 1 mW。电光脉冲幅度调制的脉冲宽度约为 100 ns, 重复频率为 1 kHz。单脉冲调制的能量为  $10^{-10}$  J, 经过 100 dB 的衰减, 以单个光子的能量

$$h\nu = 2.55 \times 10^{-19} \text{ J}$$

计算, 则每个调制脉冲中包含的光子数小于 0.1 个光子, 从而实现了准单光子的要求。

电光晶体脉冲幅度调制器驱动源 (15) 要求的输出的脉冲电压高 ( $> 150 \text{ V}$ ), 脉冲宽度窄 ( $< 100 \text{ ns}$ )。

我们在晶闸管脉冲电路基础上利用 RL 谐振回路产生高压窄脉冲, 达到电光晶体脉冲幅度调制器驱动源要求。

### 2.1.2 光子的检测(同步符合单光子检测技术)

常用的光子探测器有光电倍增管(PMT)和雪崩光电二极管(APD)。光电倍增管工作电压高, 体积大, 适用的波长有限(从紫外到可见)。雪崩光电二极管有较高的探测效率, 体积小, 工作波长可从可见到红外(400~1600 nm), 尤其在盖格工作模式下工作可达到单光子量级的探测灵敏度。

实验中所用的光子探测器是 EG & G 公司的 C30902S 硅雪崩光电二极管(Si-APD), 在实验光源 780 nm 波长处的量子效率约 70%。我们对雪崩光电二极管选用了被动淬灭电路, 为降低暗噪声, 二极管用半导体制冷块进行制冷, 工作温度约为  $-10^{\circ}\text{C}$ , 这样得到雪崩光电二极管在盖格模式下工作电压为 230 V (高于雪崩点电压 6 V), 暗计数为  $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。这样暗计数对单光子的检测产生很大影响, 因此采用同步符合单光子检测技术以提高信噪比。

其基本方法是: 用调制激光的脉冲同步信号(17)对光子探测器雪崩光电二极管(13、14)的输出信号进行符合(18), 当且仅当有脉冲同步信号时, 光子探测信号为有效, 其余时间的暗计数均被抑制。

实验中用数字电路实现了同步符合, 当重复频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 100 ns 的激光同步信号的门限开启时, 雪崩光电二极管的信号才可输出到计数器(19)。这样得到符合的暗计数为  $0.2 \text{ s}^{-1}$  以下, 即测到的  $10^3$  个光电子信号中, 暗噪声的概率为 0.2 个计数。

由于实验中光路长度为 1 m, 光子传输时间小于 4 ns, 光脉冲间隔 1 ms, 又衰减到每个脉冲只有 0.1 个光子, 即折合到单个光子间的空间发射距离远大于马赫-曾德尔干涉仪任一臂的有效长度, 因此当单个光子进入马赫-曾德尔干涉仪时, 整个干涉仪中只有这一个光子, 如果有干涉现象发生必然是由这一个光子在马赫-曾德尔干涉仪中完成的。

### 2.2 单个光子操控的相位定标

要通过单个光子的干涉实现单个光子的路由操控, 必须先对单个光子干涉的相位有一个定标, 确定单个光子干涉的出射路径。因此我们先连续改变压电微位移器上的驱动电压, 由同步符合单光子计数对出射到  $D_1$  和  $D_2$  的单个光子进行记录。结果见图 3。

实验中我们使用了透过率为 0.37 的分束镜

BS1 和 BS2; 从图 3 中, 可以看到在压电微位移器电压为 30 V 和 70 V 时, 出射的单个光子选择  $D_2$  或  $D_1$  端的出射。由图 3 计算可得,  $D_1$  干涉对比度为 0.82,  $D_2$  的干涉对比度为 0.95。

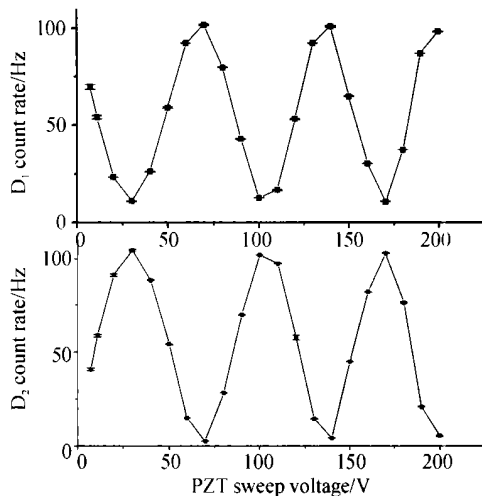


Fig. 3 Interference of single photon in space

### 2.3 单个光子的路由操控的实验结果

由图 3 的干涉图样的定标, 我们确定压电微位移器电压 30 V 和 70 V 为单个光子路由控制的两个相位控制点。

当压电微位移器电压为 30 V 时, 在干涉相位的操控下, 单个光子在  $D_1$  和  $D_2$  端的出射情况由单光子探测器检测得到, 并经符合后由数字存储示波器记录, 如图 4 所示, 上路为  $D_1$  的单个光子出射情况, 下路为  $D_2$  的单个光子出射情况。由于重复频率为 1 kHz 的调制光脉冲被衰减到准单光子量级, 即每个脉冲只包含了 0.1 个光子后, 在检测中就体现为不是每个调制信号中都有光子信号, 平均每 10 个调制信号中才有 1 个光子信号, 当然也会出现多于 1 个或没有的情况。

所以当示波器时间轴设定为每个间隔为 2 ms 时, 在  $2 \text{ ms} \times 10$  的时间宽度里, 平均的光子信号数

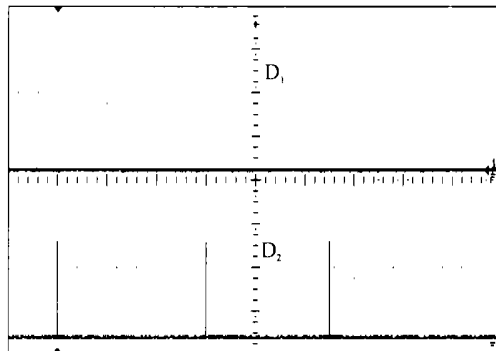


Fig. 4  $V_{\text{PZT}} = 30 \text{ V}$  route control

目为 2 个, 为了便于观察我们记录了有 3 个单个光子出射信号的画面, 从图 4 可以看到在调制的同步时间上, 只有  $D_2$  有光子出射, 而  $D_1$  没有光子出射, 说明单个光子进入干涉仪后, 由于干涉操控使得单个光子只能由  $D_2$  出射。

当压电微位移器电压设定为 70 V 时, 在干涉相位的操控下, 单个光子在  $D_1$  和  $D_2$  端的出射情况由数字存储示波器记录, 如图 5 所示, 上路为  $D_1$  的单个光子出射情况, 下路为  $D_2$  的单个光子出射情况。同上, 为了便于观察我们记录了有 3 个单个光子出射信号的画面, 从图 5 可以看到在调制的同步时间上, 只有  $D_1$  有光子出射, 而  $D_2$  没有光子出射, 说明单个光子进入干涉仪后, 由于干涉操控使得单个光子只能由  $D_1$  出射。

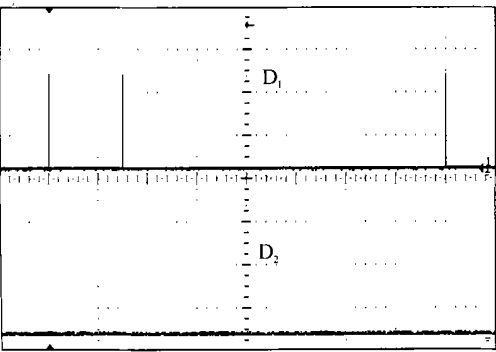


Fig. 5  $V_{PZT}=70\text{ V}$  route control

以上说明通过在两个控制电压下进行改变就可以实现对单个光子路径的操控, 即当要控制单个光子从  $D_1$  出射时, 只需对压电微位移器加 70 V 电压, 需要单个光子从  $D_2$  出射时, 压电微位移器加 30 V 电压即可。

3 光纤单个光子路由选择操控

根据空间单个光子在马赫-曾德尔干涉仪中的

路由操控的原理, 我们又利用光纤构成的马赫-曾德尔干涉仪进行了单个光子光纤中路由操控的实验, 这大大缩小了器件体积, 可以方便地实现“即插即用”而更具实用性。光纤中的单个光子干涉系统装置由图 6 所示: 单光子源仍然采用通用的脉冲调制与衰减结合的准单光子源方法。波长 780 nm 的半导体激光器 (Vortex-6013-982) 由控制信号发生器 (10) (Agilent 33250A) 进行脉冲调制, 输出重复频率为 1 kHz, 脉宽为 50 ns 的光脉冲。经衰减片组 (1) 衰减而实现准单光子的产生。产生的准单光子由透镜-光纤准直器 (2) 耦合入光纤马赫-曾德尔干涉仪进行干涉。光纤马赫-曾德尔干涉仪由两个 3 dB 的分路器 (3、6) (50 : 50) 组成, 两臂长均为 1 m, 其中一臂粘在压电换能器 (5) 上, 通过调节压电换能器的驱动电压改变干涉仪两臂光差, 从而控制单个光子相干的相位。出射光子的探测装置包括两个单光子探测器 (7、8) (EG & G SPCM-AQ13) 及带鉴幅及符合门电路的光子计数器 (9) (Photon Counter SR400-Stanford Research Systems Inc.)。探测同样采用同步符合门技术, 单光子探测器的光敏元件是硅雪崩二极管, 在 780 nm 处的量子效率可达到 70% 以上, 常温下暗计数仅  $10^2/\text{s}$ , 输出的光电信号为标准 TTL 电平, 可直接输入光子计数器的同步符合电路中。符合门的触发信号也由控制信号发生器提供, 与激光器输出光子同步触发。只有在符合门开启期间才可以进行记录及计数。实验结果如图 7 所示。 $D_1$  干涉对比度为 0.80,  $D_2$  的干涉对比度为 0.85。可以看出, 当压电微位移器电压分别选为 80 V 和 240 V 就可以操控单个光子由  $D_1$  或  $D_2$  出射。由于我们所选用的压电换能器尺寸较小, 长度仅有 10 mm, 对光纤的调节长度比较小, 如果换用较长的压电换能器或者采用在较大直径的压电陶瓷上绕圈的方法, 电压就可以大大减小。

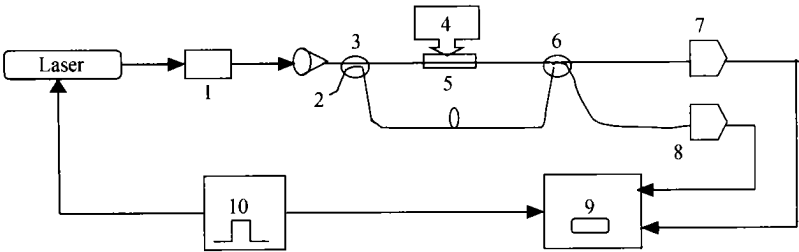


Fig. 6 Schematic of single-photon routing control in the optic fiber. 1: attenuator; 2: collimator; 3 6: coupler (50 : 50); 5: PZT (piezoelectric transducer); 4: PZT driver; 7 ( $D_1$ ), 8 ( $D_2$ ): APD; 9: photon counter; 10: control-signal modulator

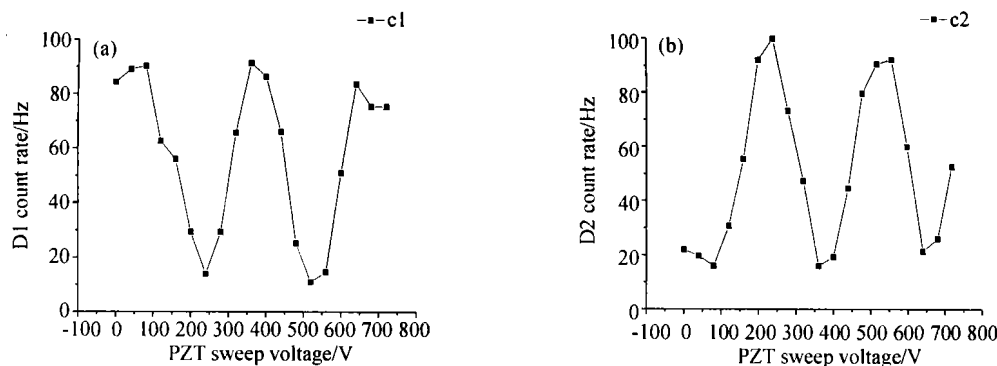


Fig. 7 Interference of single photon in the optic fiber

**结论** 我们分别利用空间及光纤马赫-曾德尔干涉仪进行了单个光子干涉的实验, 并通过改变压电换能器的电压控制马赫-曾德尔干涉仪的两臂相位差, 操控进入马赫-曾德尔干涉仪的单个光子在两个输出端  $D_1$  或  $D_2$  的选择, 实现了光子在节点上的路由。我们得到的干涉对比度在空间实验中两路分别为 0.82 和 0.95, 光纤中分别为 0.80 和 0.85。可以看出, 虽然光纤单个光子操控空间相比, 具有体积小, 操作方便, 实用性更强的优点, 但是其干涉对比度较小于空间传输。这是由于我们所使用的两个分路器对偏振敏感, 对不同偏振的入射光无法保证 50:50 分路, 另外马赫-曾德尔干涉仪的两臂是普通光纤而不是保偏光纤, 也影响了干涉结果。如果换用保偏光纤作为干涉仪两臂, 同时采用偏振无关的分路器, 可以获得更好的干涉对比度。另外, 基于马赫-曾德尔干涉仪相位控制来实现对单个光子的路由操控的理论解释工作, 还需要进一步的进行。目前, 本实验结果在量子保密通信的量子编码实验中得到很好的应用; 特别是对单个光子在光学节点上的有序操控, 将是量子网络研究中重要的关键技术, 定会得到广泛应用。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Mingming, Qin Xiaolin, Zhou Chunyuan *et al.*. Quantum random number generator based on polarization. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2003, **52**(1): 72~76 (in Chinese)
- 2 Sun P C, Mazurenko Y, Fainman Y. Long-distance frequency-division interferometer for communication and quantum cryptography. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(9): 1062~1064
- 3 Werner M J. Quantum soliton generation using an interferometer. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(19): 4132~4135
- 4 Shimizu K, Imoto N. Communication channels secured from eavesdropping via transmission of photonic Bell states. *Phys. Rev. (A)*, 1999, **60**(1): 157~166
- 5 Cerf N J, Adami C, Kwiat P G. Optical simulation of quantum logic. *Phys. Rev. (A)*, 1998, **57**(3): 1477~1480
- 6 Shimizu K, Imoto N. Single-photon-interference communication equivalent to Bell-state-basis cryptographic quantum communication. *Phys. Rev. (A)*, 2000, **62**(5): 054303-1~054303-4
- 7 Hellmuth T, Walther H, Zajonc A *et al.*. Delayed-choice experiments in quantum interference. *Phys. Rev. (A)*, 1987, **35**(6): 2532~2541
- 8 Reck M, Zeilinger A, Bernstein H J *et al.*. Experimental realization of any discrete unitary operator. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(1): 58~61
- 9 Liao J, Liang C, Wei Y J *et al.*. Quantum random number generator based on 50:50 optical beam splitter. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **50**(3): 467~472 (in Chinese)