

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

H04B 10/12

H04B 10/02 H04Q 3/52

H04Q 1/18



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 02157692.0

[43] 公开日 2003 年 6 月 18 日

[11] 公开号 CN 1424826A

[22] 申请日 2002.12.24 [21] 申请号 02157692.0

[71] 申请人 华东师范大学

地址 200062 上海市中山北路 3663 号

[72] 发明人 周春源 吴 光 曾和平

[74] 专利代理机构 上海德昭专利事务所

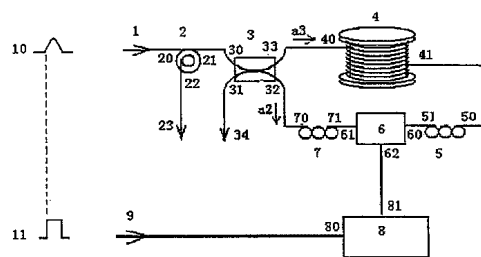
代理人 程宗德

权利要求书 1 页 说明书 8 页 附图 1 页

[54] 发明名称 光纤单光子路由操控装置

[57] 摘要

一种光纤单光子路由操控装置，包括单光子入射端口 1、环形器 2、光纤耦合器 3、光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6、延迟信号发生器 8、电信号输入端 9、单光子出射端口 23 和 34，光纤耦合器 3 的分束比为 50%：50%，光纤 4 的最大长度为 30km，单光子入射端口 1、环形器 2、光纤耦合器 3、光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6 组成光路，相位调制器 6 和延迟信号发生器 8 组成电路，能实现光纤单光子路由操控，即操控从单光子入射端口 1 入射的单光子经单光子出射端口 23 和 34 出射，路由操控成功率超过 92%，特别适于在量子保密通讯中作光纤单光子路由操控。



1. 一种光纤单光子路由操控装置，包括单光子入射端口 1、环形器 2、光纤耦合器 3、光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6、延迟信号发生器 8、电信号输入端 9、单光子出射端口 23 和 34，环形器 2 有三个端口，入射端口 20、出射端口 21、返回出射端口 22，光纤耦合器 3 有四个端口，双向端口 30、31、32 和 33，光纤耦合器 3 的分束比为 50%：50%，光纤 4 有两个端口，双向端口 40 和 41，偏振控制器 5 和 7 各有两个端口，双向端口 50、51 和 70、71，相位调制器 6 有三个端口，双向端口 60 和 61，和电信号输入端 62，延迟信号发生器 8 有两个端口，电信号输入端 80 和电信号输出端 81，其特征在于，光纤 4 的最大长度为 30km，环形器 2、光纤耦合器 3、光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6 是工作波长与单光子脉冲 10 的波长相等的光学元器件，单光子入射端口 1、环形器 2、光纤耦合器 3、光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6 组成光路，相位调制器 6 和延迟信号发生器 8 组成电路，光路和电路内部的连接分别由光纤和电缆完成，光路内部连接：单光子入射端口 1 与入射端口 20 连接，出射端口 21 与双向端口 30 连接，双向端口 33 与双向端口 40 连接，双向端口 41 与双向端口 50 连接，双向端口 51 与双向端口 60 连接，双向端口 61 与双向端口 70 连接，双向端口 71 与双向端口 32 连接，返回出射端口 22 和双向端口 31 分别与单光子出射端口 23 和 34 连接，电路内部连接：电信号输入端 9 与电信号输入端 80 连接，电信号输出端 81 与电信号输入端 62 连接。

2. 根据权利要求 1 所述的光纤单光子路由操控装置，其特征在于，入射单光子脉冲 10 的平均每脉冲光子数 ≤ 0.5 ，波长为 1550nm，相位调制器 6 是 Aeroflex 10G 型，延时信号发生器 8 是 DG535 型，光纤 4 的长度为 5km。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的光纤单光子路由操控装置，其特征在于，光纤 4 的长度为 28km。

光纤单光子路由操控装置

技术领域

本发明涉及一种光纤单光子路由操控装置，实现在光纤中对单光子路由操控，属于量子保密通讯技术领域。

背景技术

量子保密通讯是基于光量子的通讯，信息加载于单光子上，并由单光子进行传输，未知量子态是不可克隆的，测量量子会改变量子态，这样窃听者就不可能得到通讯信息而不被发现，因此，量子保密通讯可以实现通讯的绝对保密。这将在军事机密传送和商业信息认证等方面得到广泛的应用。与现有的光通讯相似，量子保密通讯同样存在对量子信息，即单光子的路由操控问题。现有的光通讯技术中，路由器件及技术发展较为成熟，并且有各种路由方法和技术。量子保密通讯要求对单光子进行路由操控，目前，这方面研究较少。单光子路由操控装置可分为空间和光纤两类。专利号为 02111395.5 的中国专利涉及一种空间单光子路由操控装置，该装置由空间 Mach-Zehnder 干涉仪和相位调制器来完成。至于光纤单光子路由操控装置，目前尚无专利涉及。在光纤中通过单光子干涉可实现长距离的单光子路由操控，最简单的光纤中的单光子干涉可由光纤 Mach-Zehnder 干涉仪和相位调制器来完成。但是，由于光纤受环境的影响很大，当光纤长度达到几米时，光纤中的单光子干涉就不能保持稳定。

发明内容

从量子理论来看，光子是否携带“哪条路径”的信息是能否发生干涉的关键条件。一般的干涉仪中存在两条光路，在某一时刻，干涉仪中的光子只会选择一个路径，但同时存在的另一条路径也会对其产生影响。实际上是两条可能路径的光程差，或者说相位差决定了每个单光子的干涉情况。由于受到环境的影响，光纤长度的微小涨落都会

引起相位差的变动，这种涨落随光纤长度的增加而加剧，给稳定的长距离单光子路由操控的实现带来很大的困难。

本发明旨在推出一种光纤单光子路由操控装置，该装置能解决光纤中单光子干涉距离短、干涉不稳定的问题，实现单光子长距离稳定的干涉，从而实现光纤单光子路由操控并最终用于量子保密通讯。

本发明的装置采用以下结构使上述目的得以实现。现结合附图详细说明本发明的装置的结构：一种光纤单光子路由操控装置，包括单光子入射端口 1、环形器 2、光纤耦合器 3、光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6、延迟信号发生器 8、电信号输入端 9、单光子出射端口 23 和 34，环形器 2 有三个端口，入射端口 20、出射端口 21、返回出射端口 22，光纤耦合器 3 有四个端口，双向端口 30、31、32 和 33，光纤耦合器 3 的分束比为 50%：50%，光纤 4 有两个端口，双向端口 40 和 41，偏振控制器 5 和 7 各有两个端口，双向端口 50、51 和 70、71，相位调制器 6 有三个端口，双向端口 60 和 61，和电信号输入端 62，延迟信号发生器 8 有两个端口，电信号输入端 80 和电信号输出端 81，其特征在于，光纤 4 的最大长度为 30km，环形器 2、光纤耦合器 3、光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6 是工作波长与单光子脉冲 10 的波长相等的光学元器件，单光子入射端口 1、环形器 2、光纤耦合器 3、光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6 组成光路，相位调制器 6 和延迟信号发生器 8 组成电路，光路和电路内部的连接分别由光纤和电缆完成，光路内部连接：单光子入射端口 1 与入射端口 20 连接，出射端口 21 与双向端口 30 连接，双向端口 33 与双向端口 40 连接，双向端口 41 与双向端口 50 连接，双向端口 51 与双向端口 60 连接，双向端口 61 与双向端口 70 连接，双向端口 71 与双向端口 32 连接，返回出射端口 22 和双向端口 31 分别与

单光子出射端口 23 和 34 连接，电路内部连接：电信号输入端 9 与电信号输入端 80 连接，电信号输出端 81 与电信号输入端 62 连接。

工作原理。单光子脉冲 10 从光子入射端口 1 入射，经环形器 2 至双向端口 30，因为光纤耦合器 3 的分束比为 50%：50%，所以单光子以相同概率经双向端口 32 或 33 进入由光纤 4、偏振控制器 5 和 7、相位调制器 6 组成的环形光路：

1. 顺时针路径单光子 a3 从双向端口 33 进入环形光路，先后经过光纤 4，偏振控制器 5，相位调制器 6，偏振控制器 7，经双向端口 32 回到光纤耦合器 3；

2. 逆时针路径单光子 a2 从双向端口 32 进入环形光路，先后经过偏振控制器 7，相位调制器 6，偏振控制器 5，光纤 4，经双向端口 33 回到光纤耦合器 3。

如图 2，逆时针路径单光子 a2 到达相位调制器 6 的时刻为 t_1 ，而顺时针路径单光子 a3 到达相位调制器 6 的时刻为 t_2 ，有 $t_1 + t_2 \approx T_{\text{环形光路}}$ （单光子绕环形光路一周所需时间， $T_{\text{环形光路}} \approx \frac{\text{光纤 4 长度}}{V_{\text{光纤}}}$ ，其中 $V_{\text{光纤}}$ 是光在光纤中的传播速度），且 $t_1 \ll t_2$ ， $t_2 \approx T_{\text{环形光路}}$ 。单光子脉冲宽度为 τ ，延迟信号发生器 8 加至相位调制器 6 的调制脉冲的上升沿时刻为 t_m ， Δt 是调制脉冲脉宽， V_m 是调制脉冲电压幅度， t_0 是延迟时间， $T_{\text{光脉冲}}$ 是单光子脉冲的重复周期。

单光子脉冲 10 入射同时，同步电信号 11 由电信号输入端 9 传向电信号输入端 80，经延迟时间 t_0 后，延迟信号发生器 8 产生电压幅度为 V_m 的调制脉冲，经电信号输出端 81 和电信号输入端 62，抵达和驱动相位调制器 6，与此同时，光路中顺时针路径单光子 a3 或逆时针

路径单光子 a2 恰好通过相位调制器 6，从而受到调制脉冲的相位调制。

调节延迟时间 t_0 和调制脉冲脉宽 Δt ，可选择对顺时针路径单光子 a3 或逆时针路径单光子 a2 进行调制：

当 $t_0 = t_1$ 且 $\tau < \Delta t < t_2$ 时，对逆时针路径单光子 a2 进行调制；

当 $(t_1 + \tau) < t_0 < t_2$ 且 $(t_2 - t_0 + \tau) < \Delta t < (T_{\text{光脉冲}} - t_2)$ 时，对顺时针路径单光子 a3 进行调制。

调节调制脉冲电压幅度 V_m ，在 Δt 时间内加上不同的电压幅度 V_m 的调制脉冲，可得到相应两路光子的相位差 $\Delta\phi$ ： $\Delta\phi = \frac{V_m}{V\pi}\pi$ ，其中 $V\pi$ 是相位调制器 6 的半波电压，即对应相位差 π 的电压绝对值，这是相位调制器 6 在相应波长下固有的。

当 $V_m = 2nV\pi$ 时，相位差 $\Delta\phi = 2n\pi$ ， $n = 0, 1, 2, \dots$ ；

当 $V_m = (2n+1)V\pi$ 时，相位差 $\Delta\phi = (2n+1)\pi$ ， $n = 0, 1, 2, \dots$ ；

当 $V_m = (2n+1)\frac{V\pi}{2}$ 时，相位差 $\Delta\phi = (2n+1)\frac{\pi}{2}$ ， $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

顺时针路径单光子 a3 与逆时针路径单光子 a2 在光纤耦合器 3 处发生单光子干涉：

当两路单光子相位差 $\Delta\phi$ 为 π 的偶数倍时，干涉相长，单光子经双向端口 30 和返回出射端口 22，最终从单光子出射端口 23 出射；

当两路单光子相位差 $\Delta\phi$ 为 π 的奇数倍时，干涉相消，单光子经光纤耦合器端口 31，最终从单光子出射端口 34 出射；

当两路单光子相位差 $\Delta\phi$ 为 $\frac{\pi}{2}$ 的奇数倍时，单光子以相同的概率

从单光子出射端口 23 或 34 出射。

这便完成了单光子在环形光路中的分时调制。本装置只用一个相位调制器 6，根据顺、逆时针路径单光子 a_3 、 a_2 到达相位调制器 6 的时间不同，通过调节延迟时间 t_0 、脉冲脉宽 Δt 和调制脉冲电压幅度 V_m ，可任意且精确调制顺、逆时针路径单光子 a_3 、 a_2 相位，从而实现在光纤中单光子的长距离路由操控。单光子脉冲源是由激光器发出光脉冲，经衰减至单光子脉冲水平。偏振控制器 5、7 是对应于入射单光子波长下的，可以调整相位调制器 6 中单光子的偏振方向，提高单光子干涉的稳定度。

本发明的突出效果在于它能实现单光子长距离稳定的干涉，实现可用于光纤中的稳定的单光子路由操控；相位调制器 6 与电子线路直接连接，易集成；单光子路由操控成功率超过 92%。

附图说明

图 1 是光纤单光子路由操控装置的结构示意图，其中 1 是单光子入射端口，2 是环形器，3 是光纤耦合器，4 是光纤，5 是偏振控制器，6 是相位调制器，7 是偏振控制器，8 是延迟信号发生器，9 是电信号输入端口，23 和 34 是光子出射端口，10 是单光子脉冲，11 是同步电信号。

图 2 是选取相位调制器 6 调制脉冲触发时刻和调制脉冲脉宽的时序图，其中四个坐标系在同一个时间轴 t 下，“单光子脉冲”纵坐标为单光子脉冲幅度 A ，“同步信号”纵坐标为同步电信号幅度 V ，“延迟信号”纵坐标为调制电压幅度 V 。逆时针路径单光子 a_2 到达相位调制器 6 的时刻为 t_1 ，顺时针路径单光子 a_3 到达相位调制器 6 的时刻为 t_2 ，有 $t_1 + t_2 \approx T_{\text{环形光路}}$ （单光子绕环形光路一周所需时间），且

$t_1 \ll t_2$ ，单光子脉冲宽度为 τ ， t_m 是延迟信号发生器 8 对相位调制器 6 所加的调制脉冲的上升沿时刻， Δt 是调制脉冲脉宽， V_m 是调制脉冲电压幅度， t_0 是延迟时间， $T_{\text{光脉冲}}$ 是单光子脉冲 10 的重复周期。

具体实施方式

实施例 1

一种具有上述结构的光纤单光子路由操控装置，其特征在于，入射单光子脉冲 10 的平均每脉冲光子数 ≤ 0.5 ，波长为 1550nm，相位调制器 6 是 Aeroflex 10G 型，延时信号发生器 8 是 DG535 型，光纤 4 的长度为 5km。

实施例 2

一种具有上述结构或实施例 1 所述结构的光纤单光子路由操控装置，其特征在于，光纤 4 的长度为 28km。

发生单光子的单光子源和探测单光子的仪器：Agilent 33250A 型脉冲信号发生器，由它调制 New Focus-Vortex 6000 系列半导体激光器（LD）产生波长为 1550nm 的光脉冲，产生的光脉冲经过衰减片衰减至单光子水平，同时输出同步脉冲信号到 SR400 型光子计数器和 DG535 型延迟信号发生器，单光子探测器 InGaAs 雪崩二极管在单光子出射端口 23 和 34 探测到单光子，将探测到的信号传给 SR400 型光子计数器，由后者完成单光子计数。

所述的脉冲信号发生器以 10KHz 的重复频率对半导体激光器进行调制，此时光功率约为 5nW。在衰减为 -75dB 时，平均光子数 $\langle n \rangle = 0.1$ ，即每脉冲平均含有 0.1 个光子。脉冲信号发生器以 3.33KHz 的重复频率对半导体激光器进行调制，此时光功率约为 7nW。在衰减为 -75dB 时，平均光子数 $\langle n \rangle = 0.5$ ，即每脉冲平均含有 0.5 个光子

逆时针路径单光子 a2 到达相位调制器 6 的时间 $t_1 \approx 0$ ，单光子绕

形光路一周所需时间 $T_{\text{环形光路}} \approx t_2$ ，单光子脉冲宽度 $\tau \approx 10\text{ns}$ ，相位调制器 6 在 1550nm 波长下的半波电压 V_π 为 5 伏。

通过改变顺时针路径单光子 a3 相位，进行单光子路由操控，光纤 4 长度和平均光子数 $\langle n \rangle$ 分别取 5Km, 0.1 和 28Km, 0.5 各自的延迟时间 t_0 ，调制脉冲脉宽 Δt ，调制脉冲电压幅度 V_m 选取情况如表 1 所示。

表 1

光纤长度 (Km)	单光子脉冲宽度 $\tau (\mu\text{s})$	$t_2 \approx T_{\text{环形光路}} (\mu\text{s})$	单光子脉冲重复周期 $T_{\text{光脉冲}} (\mu\text{s})$	延迟时间 $t_0 (\mu\text{s})$	调制脉冲脉宽 $\Delta t (\mu\text{s})$	调制脉冲电压幅度 V_m (伏)	单光子出射端口	单光子路由操控成功率 (%)
5	0.01	25	100	24.50	1	0	23	>95
						5	34	>98
28	0.01	140	333	139.50	1	0	23	>92
						5	34	>94

通过改变逆时针路径单光子相位，进行单光子路由操控，光纤 4 长度和平均光子数 $\langle n \rangle$ 分别取 5Km, 0.1 和 28Km, 0.5，各自的延迟时间 t_0 ，调制脉冲脉宽 Δt ，调制脉冲电压幅度 V_m 选取情况如表 2 所示。

表 2

光 纤 长 度 (Km)	单 光 子 脉 冲 宽 度 τ (μs)	$t_2 \approx T_{\text{环形光路}}$ (μs)	单 光 子 脉 冲 重 复 周 期 $T_{\text{光脉冲}}$ (μs)	延 迟 时 间 t_0 (μs)	调 制 脉 冲 脉 宽 Δt (μs)	调 制 脉 冲 电 压 幅 度 V_m (伏)	单 光 子 出 射 端 口	单 光 子 路 由 操 控 成 功 率 (%)
5	0.01	25	100	0	1	0	23	>95
						5	34	>98
28	0.01	140	333	0	1	0	23	>92
						5	34	>95

综上所述，本发明在环形光路中通过对单光子分时调制，仅用了一个相位调制器 6，实现了长距离稳定的光纤单光子路由操控，干涉对比度即单光子路由操控成功率大于 92%。

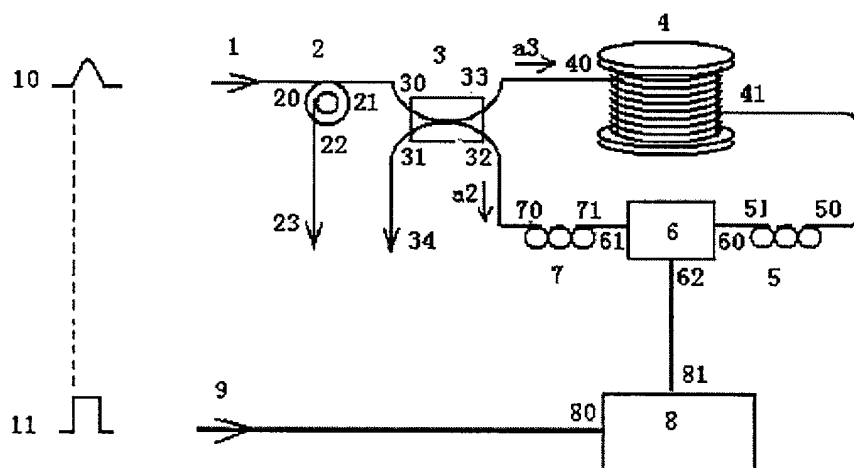


图 1

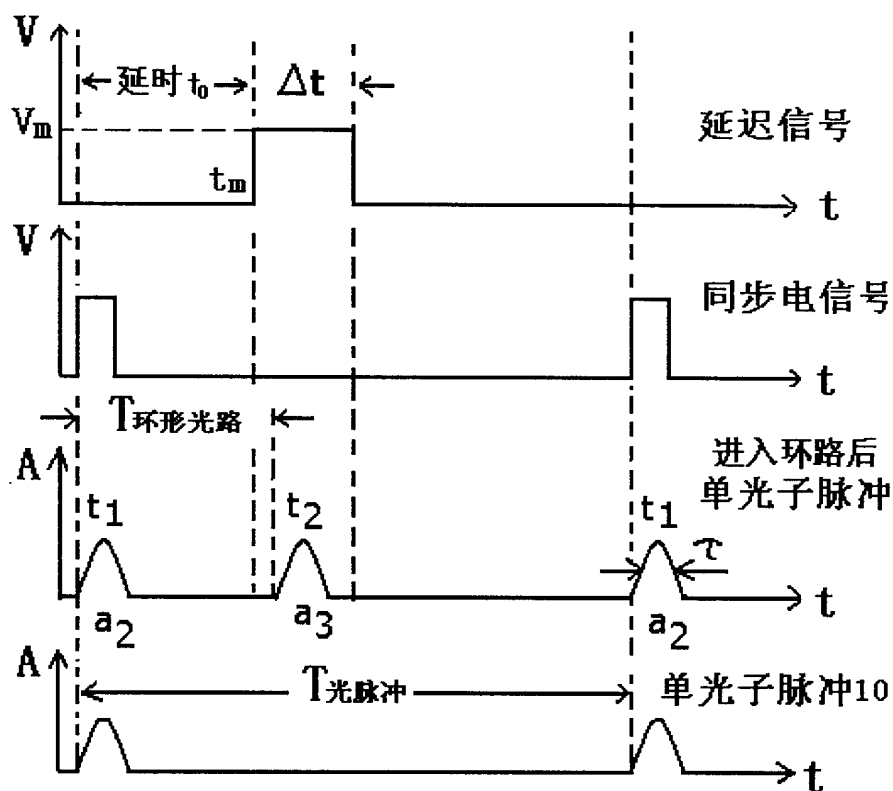


图 2