



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103959704 A

(43) 申请公布日 2014. 07. 30

(21) 申请号 201280058781. 9

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公
司 31100

(22) 申请日 2012. 09. 28

代理人 陆嘉

(30) 优先权数据

1158857 2011. 09. 30 FR

(51) Int. Cl.

H04L 9/08 (2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2014. 05. 29

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2012/069281 2012. 09. 28

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/045674 FR 2013. 04. 04

(71) 申请人 中央科学研究中心

地址 法国巴黎

申请人 尼斯索菲亚安提波利斯大学

(72) 发明人 S·坦齐里 V·达奥里亚

O·阿利巴特 A·C·M·马丁

L·拉邦特

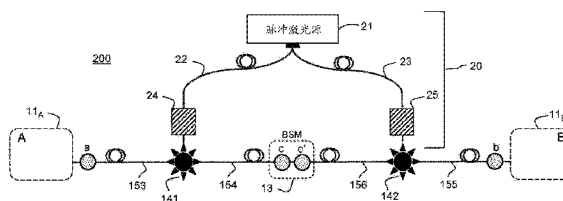
权利要求书1页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

用于同步量子通信网络的纠缠源的方法和装置

(57) 摘要

根据一个方面,本发明涉及一种在量子通信网络中用光学泵浦同步纠缠源(141、142)的装置(20),包括:脉冲光源(21),允许发射电信波长光学脉冲(I_1 、 I_2),所述电信波长光学脉冲随所有纠缠源被并行分配以提供对所述纠缠源共同的光学时钟,且对于每一纠缠源,该装置包括用于转换所分配的光学脉冲的频率的装置(243、253),从而使能在适于纠缠源的光学泵浦以生成多对纠缠光子的波长下生成光学脉冲。



1. 一种在量子通信网络中用光学泵浦同步纠缠源 (141、142) 的装置 (20), 包括: 脉冲光源 (21), 允许发射电信波长光学脉冲 (I_1 、 I_2), 所述电信波长光学脉冲被并行于该组纠缠源分配以确保对所述纠缠源的光学时钟是共同的, 且对于每一纠缠源, 该装置包括用于所分配的光学脉冲的频率转换装置 (243、253), 频率转换装置 (243、253) 允许在适于光学泵浦纠缠源以生成多对纠缠光子的波长下生成光学脉冲。

2. 如权利要求 1 所述的同步装置, 其特征在于, 所述脉冲光源 (21) 是发射 1550nm 的脉冲的激光器。

3. 如权利要求 1 和 2 中的任一项所述的同步装置, 其特征在于, 进一步包括适于所述脉冲在所述电信波长下传播的光纤区段 (22、23)。

4. 如前述任一项权利要求所述的同步装置, 其特征在于, 进一步包括对于每一纠缠源的时钟再生装置 (241、251)。

5. 如前述任一项权利要求所述的同步装置, 其特征在于, 所述转换装置是倍频器。

6. 如前述任一项权利要求所述的同步装置, 其特征在于, 所述脉冲光源是发射皮秒脉冲的激光器。

7. 如前述任一项权利要求所述的同步装置, 其特征在于, 所述同步装置适于基于使用“发射时间”量子观测值来编码光子的量子通信网络, 所述同步装置进一步包括用于准备量子观测值的装置 (26), 该装置 (26) 包括允许分配脉冲对的马赫-曾德耳干涉仪。

8. 一种在至少一个第一用户和一个第二用户 (A、B) 之间的量子通信网络, 包括对于每一个用户对的多对纠缠源 (141、142), 该多个纠缠源级联设置于所述用户之间; 以及两个纠缠源之间的中继站 (13), 且进一步包括如前述任一项权利要求所述的用于同步该组所述纠缠源的装置 (20)。

9. 如权利要求 8 所述的量子通信网络, 其特征在于, 所述纠缠源包括用于多对纠缠光子的生成的非线性光学装置。

10. 如权利要求 8 和 9 中的任一项所述的量子通信网络, 其特征在于, 用于编码由所述纠缠源发射的光子的量子观测值是发射时间。

11. 一种用于在量子通信网络中用光学泵浦同步纠缠源的方法, 包括平行于电信波长光学脉冲的该组纠缠源的发射和分配, 并局部地包括在每一纠缠源层面上的适于光学泵浦所述源的波长中的时钟脉冲的频率转换。

12. 如权利要求 11 所述的方法, 其特征在于, 进一步包括在每一纠缠源层面上的所述时钟脉冲的再生。

用于同步量子通信网络的纠缠源的方法和装置

现有技术

[0001] 本发明的技术领域

[0002] 本发明涉及用于同步量子通信网络,特别是用于长距离量子通信网络,的纠缠源的方法和装置。

[0003] 现有技术

[0004] 量子通信的目的是将量子态(或者根据术语“量子比特(quantum bit)”缩写的“量子位(qubits)”)从一处传送至另一处。图 1A 示出了第一位置 A 和第二位置 B 之间的一简单的量子通信网络 100,其允许两个遥远的对话者(惯例称作“Alice”和“Bob”)建立具有非常高机密性的密钥。在此示例中,位于位置 A 的是发射器 10,该发射器 10 包括单个光子的源 101(例如基于非线性光学的两个能级或一量子点的原子的源或者准单光子源)以及编码装置 102,该编码装置 102 能够编码要通过量子态(量子位)以随机方式确定的光子传送的该密钥的每一位。该量子态是根据光子的属性编码的状态,称作“量子观测值(quantum observable)”,该属性例如是偏振、波长或者发射时间(另称作“时间仓(time-bin)”)。该光子例如借助光纤 15 传送。位于位置 B 的是接收器 11,该接收器 11 包括用于分析量子位的装置 111 以及两个检测器 112,例如单个光子的检测器,该两个检测器 112 允许根据两个测量基准分析量子态。用于分配为量子位的编码和分析而实现的密钥的各种已知协议允许两个同伴毫无疑问地知道该密钥或该密钥的一部分是否已被间谍 E(惯例称作“Eve”)所拦截。

[0005] 在长距离量子通信的框架内,由于量子信息的完美支持,处于所谓“电信”波长的光子已自然崭露头角(come to the forefront),因为它们同环境的相互作用很弱且因为在标准光纤中的传播损耗很小。电信波长是由国际电信联盟(ITU)以标准化频带(例如 O, E, S, C, L, U)的形式定义的。但,尽管很低,传送损耗设定了一极限,超过该极限的情况下通信不再可行,因为检测到的光子速率变得低于检测器的噪声率,该噪声率仍是信噪比的主要限制。大量研究工作虽然推动这些安全链接至几百公里的距离,但其代价是在所用硬件的优化方面的相当大的努力以及非常低的建立密钥的最终机率。实际上,由于所谓的“不可克隆”定理,借助标准电信放大器(中继器)的光信号重建在量子通信中是不可能的,因为这会以与间谍设法拦截信号相同的方式扰乱该信号。

[0006] 图 1B 提出了 A 和 B 之间的量子通信网络,其中通信距离可以加倍。因此,用于发射纠缠光子的源(即纠缠源)14 发射与其量子观测值之一相关的多对光子。换言之,无法限定单独采用的光子中的每一个的量子态。这种纠缠光子对的源是,例如,基于非线性光学并包括在非线性晶体中将从泵浦束发出的光子转换成一对光子,该转换按一定的概率发生。接收器 11 位于位置 A 和 B 的每一处,每一接收器包括同图 1A 的接收器 11 相类似的元件(未示出)。纠缠光子在分别标号为 151 和 152 的光纤区段上沿源 14 的任一侧传播至位置 A 和 B,可以理解,相对于图 1 的网络,如果采用相同的技术资源(特别是光纤和检测器),可以差不多加倍 A 和 B 之间的通信距离。但,与传送损耗有关的相同限制适用于每一区段,因而将不可能获得比图 1A 类型的方案中所获得的网络长度大两倍的网络长度。

[0007] 基于“量子中继”概念的量子通信网络可实现覆盖更长的距离。在这种网络中,多对纠缠光子,也就是说由它们的量子观测值之一绑定,在较短的片段(section)上传播并级联组合以覆盖更大的距离(例如参见 D. Collins 等人的“用于长距离量子中继加密的量子中继(Quantum relays for long distance quantum relay cryptography)”, Jour. Mod. Opt. 52, 735(2005))。接着,提到“纠缠传送(entanglement teleportation)”。图 1C 相应地示出 A 和 B 之间的量子通信网络,具有两个空间上分开的纠缠光子源 141 和 142 以及位于这两个源之间的中继站 13,在该中继站 13 中实施投影测量操作,根据术语“贝尔态测量(Bell State Measurement)”的缩写,该操作被称为 BSM。纠缠源 141 发射多对纠缠光子 a 和 c,它们分别在光纤区段 153、154 上传播至 A 处的接收器 11_A 以及中继站 13。纠缠源 142 发射多对纠缠光子 b 和 c',它们分别在光纤区段 155、156 上传播至 B 处的接收器 11_B 以及中继站 13。如前所述,这些接收器包括用于分析量子位的装置以及一对单光子检测器。中继站允许对分别由两个独立源 141 和 142 发射的光子 c 和 c' 的称作贝尔态的状态进行投影测量,该投影测量是基于源自两个纠缠源中的每一个的光子 c 和 c' 的双光子干涉。该干涉测量触发位于 A 和 B 处的每一接收器的一信号,允许分别测量量子位 a 和 b。但,必须将该组纠缠光子源与一时间同步,该时间小于光子 c 和 c' 的相干时间,即通常小于一皮秒(picosecond)的时间,或者取决于所采用的源而实际上甚至小于几十飞秒(femtosecond),从而确保由独立源发射的光子在一或多个中继站处的时间重叠(temporal overlap)。因此,图 1C 类型的长距离网络的实验性实现受技术限制的影响,主要是由于位于较长距离处的多个纠缠源的同步的必要性。

[0008] 特别是,纠缠源的光子或光电子同步造成定时抖动的增加,这仅可以通过借助光子的光谱滤波增加纠缠光子的相干时间从而减少量子位通信频率来补偿。例如,(参见 R. Kaltenbaek 等人的“完全独立源的高保真纠缠交换(High-fidelity entanglement swapping with fully independent sources”, Phys. Rev. A, 79, 040302(2009)) 已显示出:采用纠缠源的光电子同步,不可能使得这些纠缠源相隔超过 30km,且采用这个技术的情况下诸对纠缠光子的发射频率保持限制于 100MHz。

[0009] 已提出一种光电子同步的混合方法,暗指 2GHz 下通信的可行性(参见 O. Landry 的博士论文“量子中继器的工具:量子远程传送、纠缠光子的独立源以及纠缠纯化(Tools for quantum repeaters: quantum teleportation, independent sources of entangled photons and entanglement purification),日内瓦大学(Univ. of Geneva), 2010, no Sc. 4163 以及 O. Landry 等人的“用于量子通信实验的独立皮秒光子源的简单同步(Simple synchronization of independent picosecond photon sources for quantum communication experiments)”arXiv:1001.3389(2010)))。更精确的,在 O. Landry 的博士论文的第 6 章描述了用于量子通信网络的独立纠缠源以及这些源的同步。该同步是基于由主激光器(“锁模激光器”)实施的光脉冲的发射,一方面使得泵浦纠缠源之一且另一方面使得触发一从激光器成为可能,该从激光器自身用于泵浦第二纠缠源。但再一次的,由主激光器外部触发从激光器引起定时抖动效应,这有关于光电子转换和电光转换,从而限制了同步的准确性并最终限制了纠缠源可以相隔的最大距离。

[0010] 专利申请 US2009/0317089 描述了一种量子通信网络架构,包括级联链接的中继站从而增加了通信距离。该架构是基于使用单个泵浦激光源用于在第一站中创建第一对纠

缠光子,且随后在给定距离处在第二站中借助分流出并传送至该第二站的一部分泵浦束创建第二对纠缠光子,创建第二对纠缠光子的条件在于对第一对光子之一的检测。然而,该顺序的操作方式假定:在前一站分流的部分泵浦束的每一段与前一站处创建的纠缠光子对的纠缠光子之一耦合,显示出这种实现方式在技术上的棘手。此外,由于传送损耗,波长必然短于纠缠光子波长的泵浦束在两个站之间的传播限制了诸站之间的距离。还注意到:所描述的技术涉及在生成纠缠光子处的实际站中的对该纠缠光子的检测,因此限制了通信范围。

[0011] 本发明的目的在于提出一种用于同步纠缠源的完全光学的方法和装置,其允许在基于高比特率量子中继的网络上且覆盖非常长距离的量子通信,而不存在现有技术的这些限制。

发明内容

[0012] 根据第一方面,本发明涉及一种用于在量子通信网络中用光学泵浦同步纠缠源的装置,包括:脉冲光源,允许发射电信波长光学脉冲,该电信波长光学脉冲被并行于该组纠缠源分配以确保对该纠缠源的光学时钟是共同的,且对于每一纠缠源,该装置包括用于所分配的光学脉冲的频率转换装置,该频率转换装置允许在适于光学泵浦纠缠源以生成多对纠缠光子的波长下生成光学脉冲。

[0013] 该完全光学同步的新颖概念实现了单个脉冲源能够传递对网络的各种纠缠源共同的光学时钟,能够避免光电装置所固有的时间抖动之外的时间抖动,并能够建立长距离上的高比特率量子通信网络。该新颖形式的同步可以应用于具有任意数量的纠缠源和用户的量子通信网络中实施的无论什么协议,其中用户之间进行成对通信。

[0014] 根据一个变型例,该脉冲光源是发射 1550nm 的脉冲的激光器。更多地用在电信中的该波长允许使用低成本标准电信组件(组件和光纤)。

[0015] 根据一个变型例,该同步装置进一步包括对于每一纠缠源的时钟再生装置。该时钟再生装置例如可以包括能够补偿由于从脉冲源至纠缠源的时钟脉冲传播引起的色散(dispersion)的色散补偿模块和/或用于恢复平均光功率的光学放大器。

[0016] 根据一个变型例,用于分布式光学脉冲的频率转换装置是倍频模块或者频率和模块。适于光学泵浦纠缠源的波长一般是在可见范围内,但借助新颖的同步概念,如必要,向可见转换是在纠缠源层面局部地实施的,限制光纤中的时钟脉冲传播损耗。

[0017] 有利地,该转换装置是倍频器,例如商业上可得的周期偏振铌酸锂的波导。

[0018] 根据一个变型例,该脉冲光源是发射掌握好其整形的皮秒脉冲的激光器。此外,这些源提供高重复率。

[0019] 根据适于使用发射时间作为用于编码光子的量子观测值的量子通信网络的一个变型例,该同步设备进一步包括用于使用马赫-曾德耳干涉仪准备量子观测值的装置。该马赫-曾德耳干涉仪允许在纠缠源处分配脉冲对。这简化了纠缠源层面处的量子位的编码,因为在脉冲光源层面处单个准备模块是必要的而在每一纠缠源层面处就不再必要。

[0020] 根据第二方面,本发明涉及一种在至少一个第一用户和一个第二用户之间的量子通信网络,包括对于每一个用户对的多个纠缠源,该多个纠缠源级联设置于该用户之间;以及两个纠缠源之间的中继站,该中继站允许用户之间的纠缠远程传送,且进一步包括根据

第一方面的用于同步该组该纠缠源的装置。

[0021] 根据一个变型例,该纠缠源包括用于生成多对纠缠光子的非线性光学装置。例如,这可以需要 4-波混合或自发参量下转换 (spontaneous parametric conversion)。在一个或其他的这些示例中,用于实现这些效果的装置是商业上可得的。

[0022] 根据一个变型例,该光子的量子观测值是发射时间。

[0023] 根据第三方面,本发明涉及一种用于在量子通信网络中用光学泵浦同步纠缠源的方法,包括平行于电信波长光学脉冲的该组纠缠源的发射和分配,并局部地包括在每一纠缠源层面上以适于光学地泵浦该源的波长对时钟脉冲的频率转换。

[0024] 有利地,根据第三方面的方法进一步包括在每一纠缠源层面上的该时钟脉冲的再生。

附图说明

[0025] 在阅读由以下附图所示的详细描述的基础上,本发明的其他优点和特征将变得显而易见。附图中,相同的元件用相同的标号来标记。

[0026] 图 1A 至图 1C(已描述)是示出根据现有技术的两个用户之间的量子通信网络的示意图;

[0027] 图 2 是以一般性方式示出了根据本发明的一示例性实施例的具有用于同步纠缠源的装置的通信网络的示意图;

[0028] 图 3 是显示图 2 所示的通信网络的一个特殊示例的示意图;

[0029] 图 4 是示出根据本发明的量子通信网络的一个变型的示意图。

具体实施方式

[0030] 图 2 描绘了根据本发明的位于位置 A 和 B 处的两个用户 Alice 和 Bob 之间的量子通信网络 200 的一个示例性实施例。该量子通信网络类似于图 1C 中所示的网络 100,是一个基于量子中继的网络。它包括多个光学泵浦的纠缠源 141、142 以及设置于这些源之间并允许用户之间的纠缠传送 (entanglement teleportation) 的多个中继站 13。这些纠缠源中的多对纠缠光子的生成,例如是通过泵浦非线性光学组件而得到的,例如借助于非线性光纤中的第 3 阶非线性效应 ($x^{(3)}$) 的 4-波混合的过程或者通过非线性晶体中的第 2 阶非线性效应 ($x^{(2)}$) 的自发参量下转换,或者根据术语“自发参量下转换 (spontaneous parametric down conversion)”的缩写也称为 SPDC。在本例中,仅示出两个纠缠源,但本发明同样适用于包含 n 个纠缠源的通信网络, $n \geq 2$,然后设想 $n-1$ 个中继站,在两个源之间有一个中继站。一方面在纠缠源和中继站之间且另一方面在纠缠源和用户之间,光纤区段 153、154、155、156 允许纠缠光子的传播,优选在电信波长下,从而确保光子在每一区段上的传播具有最低的可能的损耗。对于每一位用户,接收器 11A、11B 允许分析最近的源所生成的一对纠缠光子中的光子的量子态。如前所述,接收器包括例如用于分析量子位的装置以及用于根据两个测量基准分析光子的量子态的两个检测器。所使用的检测器是例如用于单光子检测或 SSPD 的超导检测器,其中 SSPD 是“超导单光子检测器 (superconducting single-photon detectors)”的缩写。

[0031] 在图 2 的示例中,量子通信网络还包括用于同步纠缠源 141 和 142 的装置 20。该

同步装置 20 包括脉冲光源 21, 有利的是激光源, 例如皮秒激光源, 该光源允许发射分布式脉冲至一组纠缠源以确保对于这些源共同的光学时钟。在本申请的下文中, 这些脉冲被称作“时钟脉冲”。源的波长、脉冲的持续时间以及重复率被选择作为网络的长度的函数。有利地, 为了覆盖最大距离同时最小化传播损耗, 波长能被选择在 ITU 所标准化的电信频带中 (例如频带 O, E, S, C, L, U)。以下将称作“电信”波长。适合于在激光源 21 的发射波长下传播的光纤区段 22、23 允许分别传播时钟脉冲至纠缠源 141、142。或者, 当该脉冲光源在一个包含于某一个大气透明带 (one of the transparency bands of atmosphere) 中的频谱带 (可见频谱带, 以及以 $4\mu\text{m}$ 、 $4.6\mu\text{m}$ 和 8.5 至 $10\mu\text{m}$ 为中心的频谱带) 中发射的情况下, 自由空间中的时钟脉冲的传播也是可能的。实践中, 由于大气透明频谱带中的单个光子的源和检测器的可用性, 只有可见光中发射的激光源是想得到的。可见光中的自由空间传播提升了特别是与自然障碍物和气象条件有关的实现难度, 以及与杂散光有关的实现难度, 后者会限制针对夜间条件的实现。尽管自由空间中的时钟脉冲的传播对于本发明的实施来说是理论上可能的, 但这种实现作用不佳, 使得电信波长下的时钟脉冲通过光纤传播成为优选。

[0032] 有利地, 该同步装置进一步包括: 在每一纠缠源层面上的用于整形时钟脉冲的模块 24, 它使得再生和 / 或适应泵浦纠缠源所必需的波长成为可能。在实际传播的过程中, 对于大的距离, 损耗和色散 (chromatic dispersion) 会分别引起平均光功率的降低以及用作纠缠源的光学时钟的脉冲持续时间的扩大。如随后将更详细地描述的, 模块 24 可以包括例如时钟再生装置, 其使得补偿由于从激光源至纠缠源的脉冲传播所导致的色散效应成为可能。它还可以包括低噪声高增益放大器, 例如掺铒光纤放大器, 其使得恢复合适的平均光功率成为可能, 这种类型的放大器仅仅引入非常小或者可忽略的定时抖动。时钟脉冲整形模块 24 还包括用于光学时钟脉冲的频率转换装置, 例如使用按倍频架构 (或者根据术语“二次谐波发生 (second harmonic generation)”的缩写称为 SHG) 或者按频率和架构 (或者根据术语“和频发生 (sum frequency generation)”称为 SFG) 运行的非线性光学组件, 并允许以适于泵浦纠缠源来生成纠缠光子对的合适波长生成光学脉冲。该合适波长是, 例如在可见光中, 能够泵浦纠缠源的非线性光学组件以在电信波长生成纠缠光子。以上描述的一组用于整形时钟脉冲的步骤可以用电信工业中所使用的商业上可得的组件实施。特别是, 频率转换可以借助商业上可得的非线性波导 (根据术语“非线性波导 (non linear waveguides)”的缩写称为 NL/W) 来实施, 由于光纤的有效性、紧密度和可能性, 该非线性波导尤其适合于一面倍频一面着眼于基于 SDPC 类型的机制与纠缠源一起使用。由此描述的时钟脉冲的分配以及随后的局部整形能够自动同步该组纠缠源。有关诸对纠缠光子发射的最终时间抖动仅取决于光学脉冲源的固有定时抖动, 通常约是激光脉冲持续时间的几分之一。

[0033] 由此描述的同步装置可应用于使用任何量子观测值 (特别是偏振、频率、发射时间) 来编码光子的量子通信网络。

[0034] 图 3 描绘了依据图 2 的量子通信网络的更详细的示例性实施例元素。

[0035] 时钟脉冲的光学发射源 21 例如是皮秒激光器, 运行于电信频带中的 5GHz, 例如处于 1550nm。该时钟脉冲 (本例中标记为 I_1 、 I_2) 被分配于在给定距离的标准光纤 (22、23) 上朝向纠缠源 141、142 的任一侧, 该给定距离可以是多达几百公里或者实际上通过使用中继

器而更长,只要这些组件所使用的技术不会引入任何额外的定时抖动。根据与长距离光纤中的传播有关的可预知效果来选择光学发射源的参数。例如,中心波长适于确保光纤中的最小损耗。例如在本例中,二氧化硅中的最小损耗。脉冲持续时间(例如约 1ps 的数量级)和平均光功率(通常为 0.1mW)的选择是基于避免时钟脉冲传播期间的非线性效应(例如自相位调制型的)同时维持足够短的脉冲持续时间以允许对光子对进行简单的光谱滤波操作(该滤波能够适应光子的相干时间(处于傅里叶极限的光子))所构成的折衷。此外,重复率应尽可能大以明显增加量子通信的比特率。但,连续到达光子计数器的两个光子必须能够被分开;因此重复率受到用于光子计数器的技术的限制。通常,用于检测单个光子的超导检测器(SSPD)现在通常在 40ps 的定时抖动下运行(例如参见 M. Halder 等人的“通过时间测量纠缠独立光子(Entangling independent photons by time measurement)”《自然物理》(Nature Phys.) 3, 692(2007)),时钟脉冲发射源的重复率限制于 5GHz。

[0036] 该同步装置可以有利地包括用于准备量子观测值的模块 26,该模块 26 特别适于基于通过发射时间(“时间仓”)编码光子的量子通信网络。由于光纤中传播期间会出现的退相干效应的限制,通过发射时间编码现在被认可为用于长距离量子通信的最稳健协议之一(例如参见 H. de Riedmatten 等人的“与来自分开的源的光子的长距离纠缠交换(Long-distance entanglement swapping with photons from separated sources)”, Phys. Rev. A, 71, 050302(R) (2005))。该用于准备量子态的模块 26 能够自身预编码时钟脉冲。相应地,模块 26 包括时间解复用器装置,其直接设置于脉冲激光源 21 的输出处并能够生成多对相干脉冲,也就是说呈现一对脉冲中的两个脉冲之间的恒定相位关系。时间解复用器装置例如是马赫-曾德耳干涉仪(Mach-Zehnder interferometer),其臂被调节用以将入射脉冲分成两个时间移位脉冲。由此生成的脉冲对被调度至纠缠源,以便被局部地频率转换并用于泵浦非线性光学组件,允许生成由它们的发射时间纠缠的光子。

[0037] 如图 3 所示,光纤 22、23 中的色散可分别由色散模块 241、251(例如,合适波长的色散位移光纤或者根据术语“色散位移光纤(dispersion-shifted fiber)的缩写称为 DFS”)补偿。模块 241、251 分别形成图 2 中所描绘的时钟脉冲整形模块 24、25 的一部分。此外,在本例中,模块 24、25 分别还包括光学放大器(242、252)和倍频装置(243、253)。有利地,偏振器(图 3 中未示出)安置于倍频器的前面,以保持感兴趣的偏振轴。如果时钟脉冲被去偏振以预先阻止由于光纤中传播期间双折射的时间变化引起的偏振旋转效果,可以设想该偏振器。通常,申请人已显示出在约 100km 的传播后时钟脉冲的平均光功率的损耗是大约 -30dBm 的数量级。时钟脉冲可借助商业上可得的掺铒光纤放大器型的光学放大器(242、252)再生,该放大器的增益通常是 60dB。倍频级 243、253 例如是其效用已被广泛认识的周期偏振铌酸锂的波导(或者根据术语“周期偏振铌酸锂波导”的缩写 PPLN/W)。

[0038] 纠缠源 141、142,包括例如非线性光学组件,其允许将泵浦脉冲(775nm 的双倍时钟脉冲)转换成分别在 1549nm 和 1551nm 的非退化信号对和互补(惰)光子。由此获得的两对纠缠光子中的两个内部光子(c 和 c')被调度至用于分析贝尔态(或 BSM)的装置 13,其中光子干涉的测量是借助双光子干涉装置 135 来实施的(例如参见 P. Aboussouan 等人的“使用皮秒架构分离源的电信波长下的高能见度双光子干涉(high-visibility two-photon interference at a telecom wavelength using picosecond-regime separated sources)”,《物理评论》(Physical Review) A81, 021801(R) (2010)。有利地,

可以设想在 BSM 的输入处的色散补偿模块 134、135。多对纠缠光子的外部光子 (a 和 b) 被分别调度至用户 Alice 和 Bob 的接收器 A 和 B。每一个接收器例如如前所述地包含与计算机 113 相关联的量子位分析装置 111 和两个接收器 112。

[0039] 因此, 申请人已论证了借助用于同步纠缠源的原始方式和装置的、基于独立纠缠光子源和用户之间的中继操作的长距离量子通信网络的可行性。由此公开的同步方法的完全光学方法允许以高速率同步远距离纠缠源, 且没有额外的定时抖动。申请人已展示采用商业上可得的电信和非线性光学组件的相隔超过 400km 的两个用户之间的量子通信的可行性。在成对通信中, 该概念可扩展至无限数量的纠缠源和用户。因此, 图 4 示出了一方面在用户 A 和 B 之间且另一方面在用户 A' 和 B' 之间的示例性量子通信网络。分别在 A 和 B 之间以及 A' 和 B' 之间, 设置了足够的纠缠源 (141 至 144 以及 145 至 148), 它们由 BSM 型的中继站 (131 至 133 以及 134 至 136) 进行中继, 以确保所寻求的距离上的成对量子通信。诸如如前所述的同步装置 20 能够确保该组纠缠源 141 至 148 的同步, 而不会引入额外的定时抖动, 从而实现了高比特率通信。

[0040] 尽管通过一定量的详细示例性实施例进行描述, 但根据本发明的同步过程和装置包含了不同的变型例、修改和增强, 它们对于本领域的技术人员来说是显而易见的。可以理解, 这些不同的变型例、修改和增强构成了诸如由权利要求书所限定的本发明的范围的一部分。

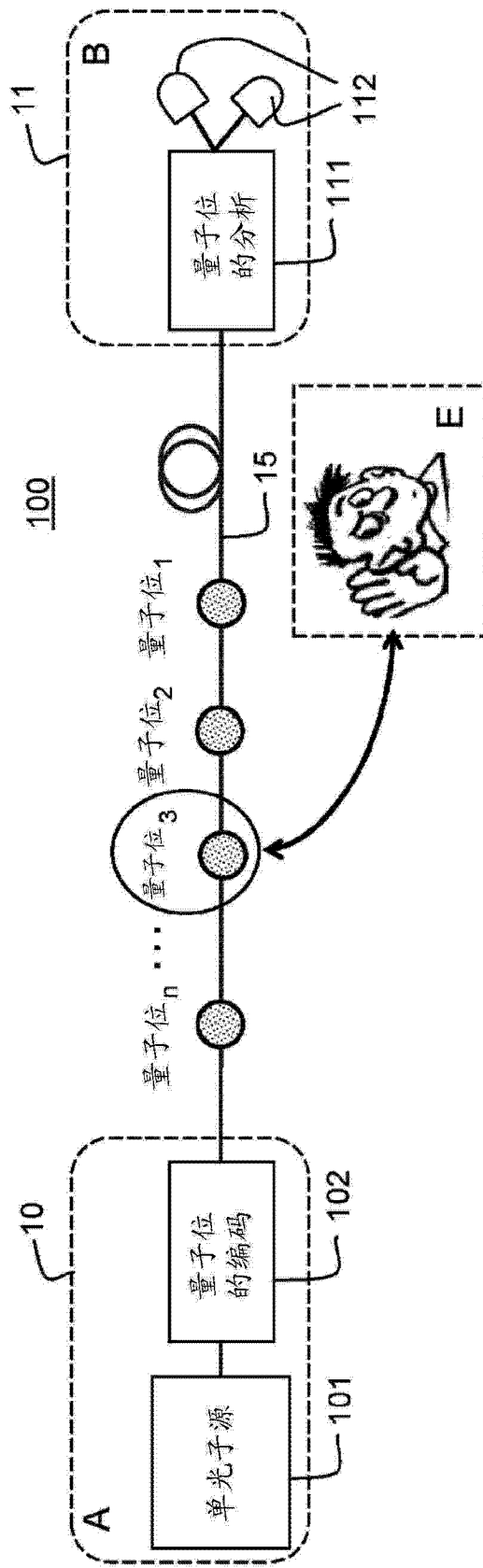


图 1A

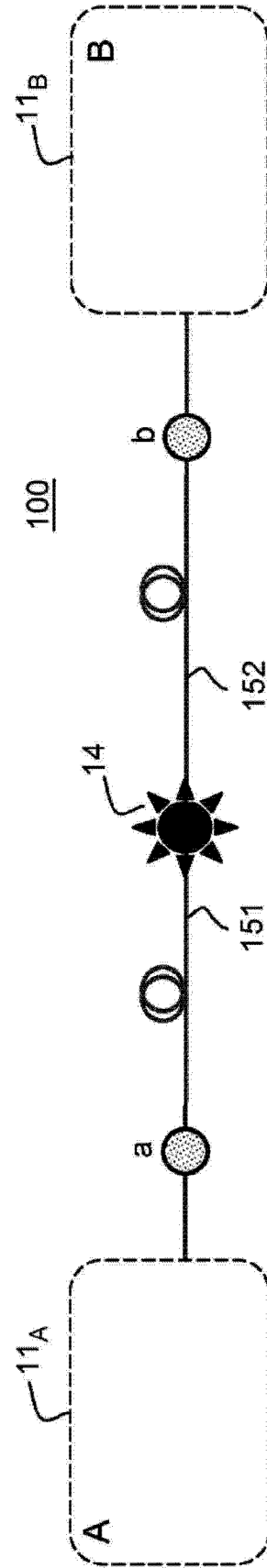


图 1B

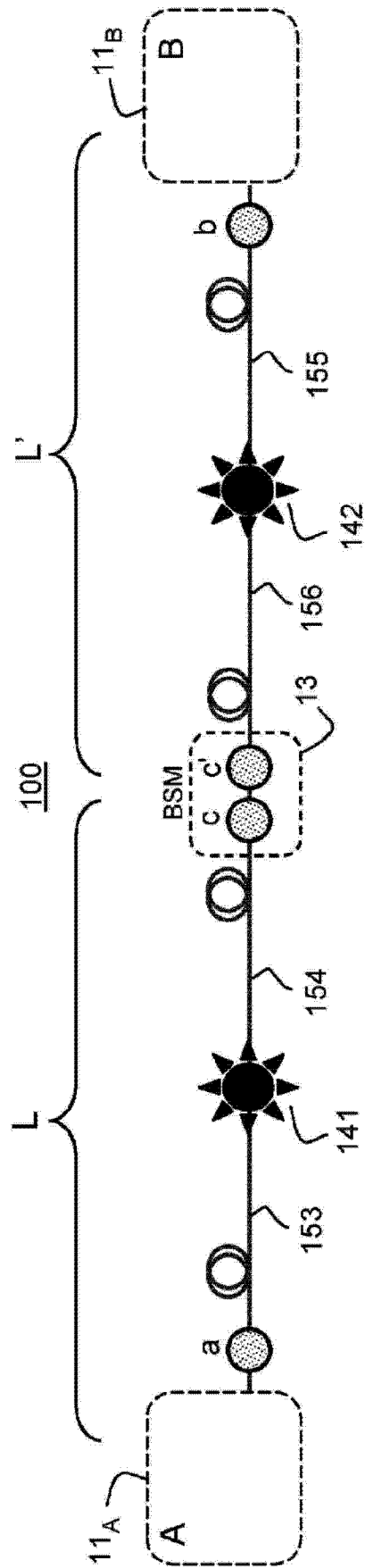


图 1C

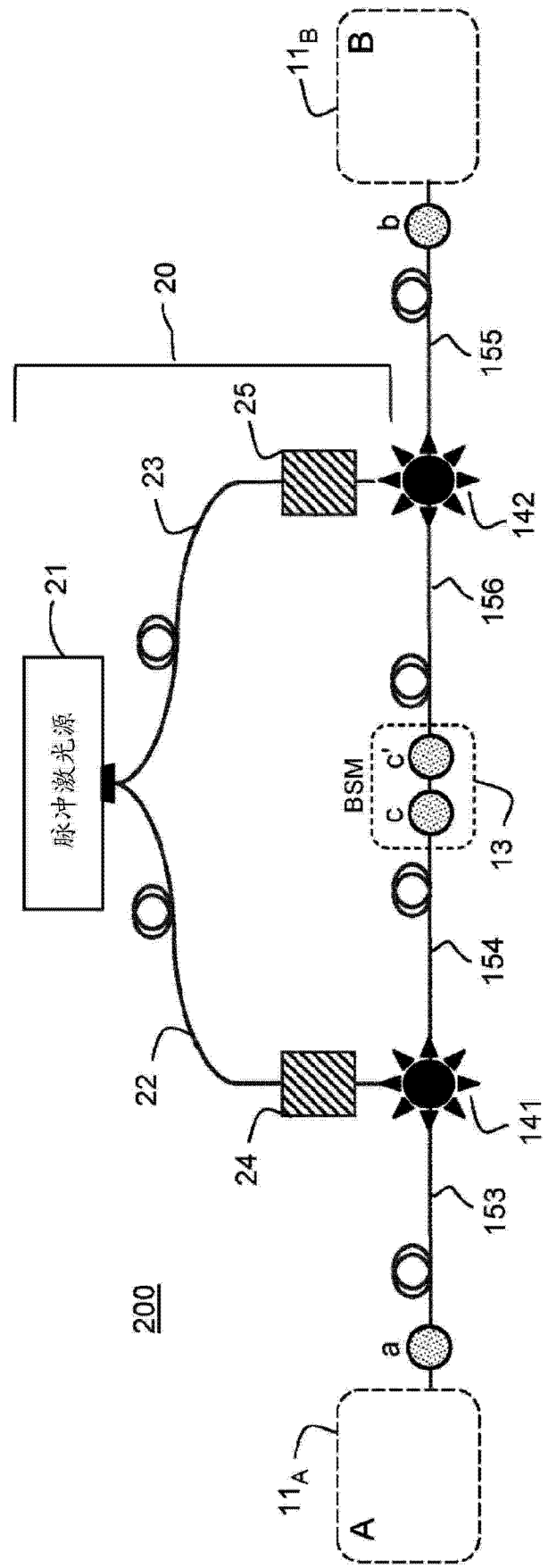


图 2

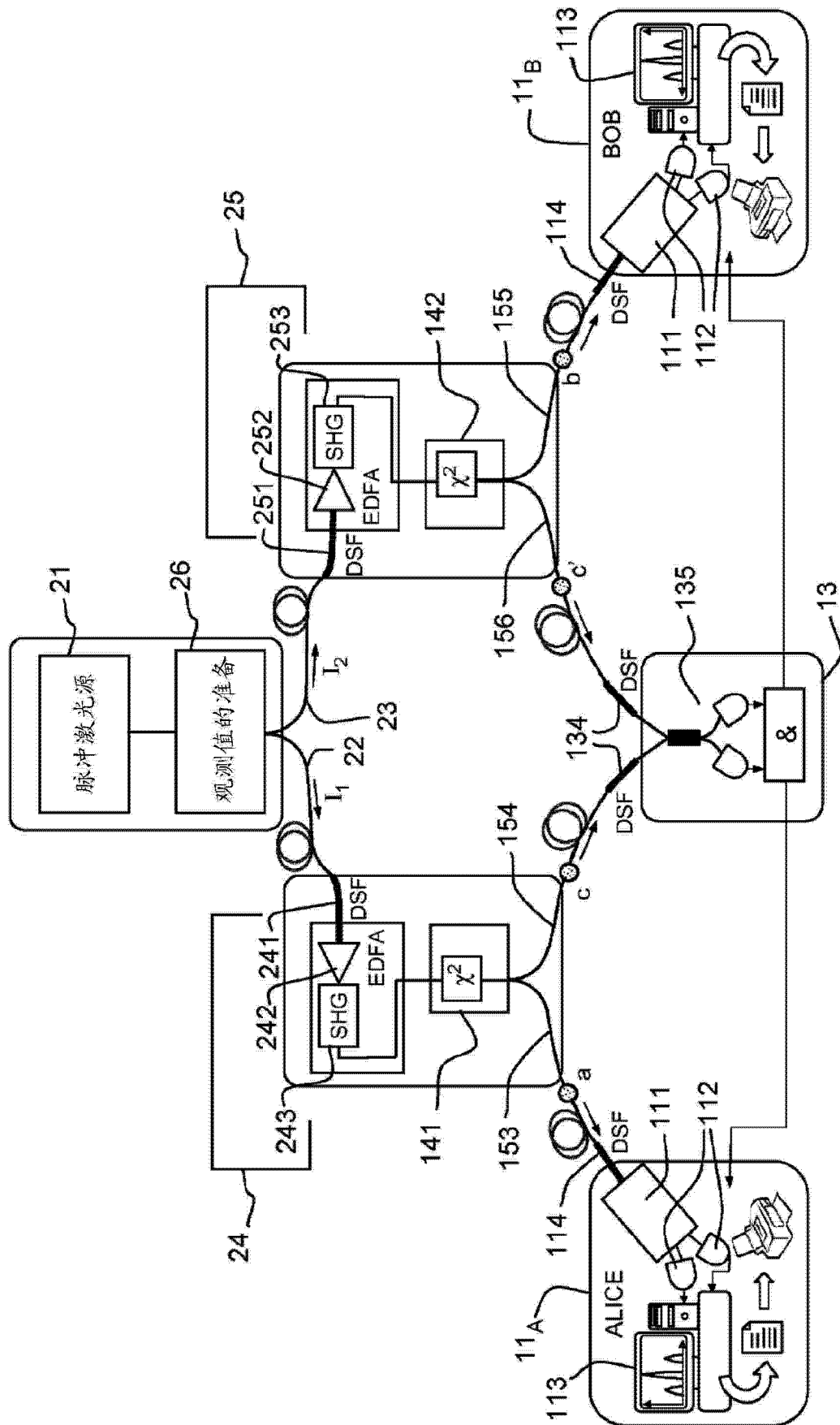


图 3

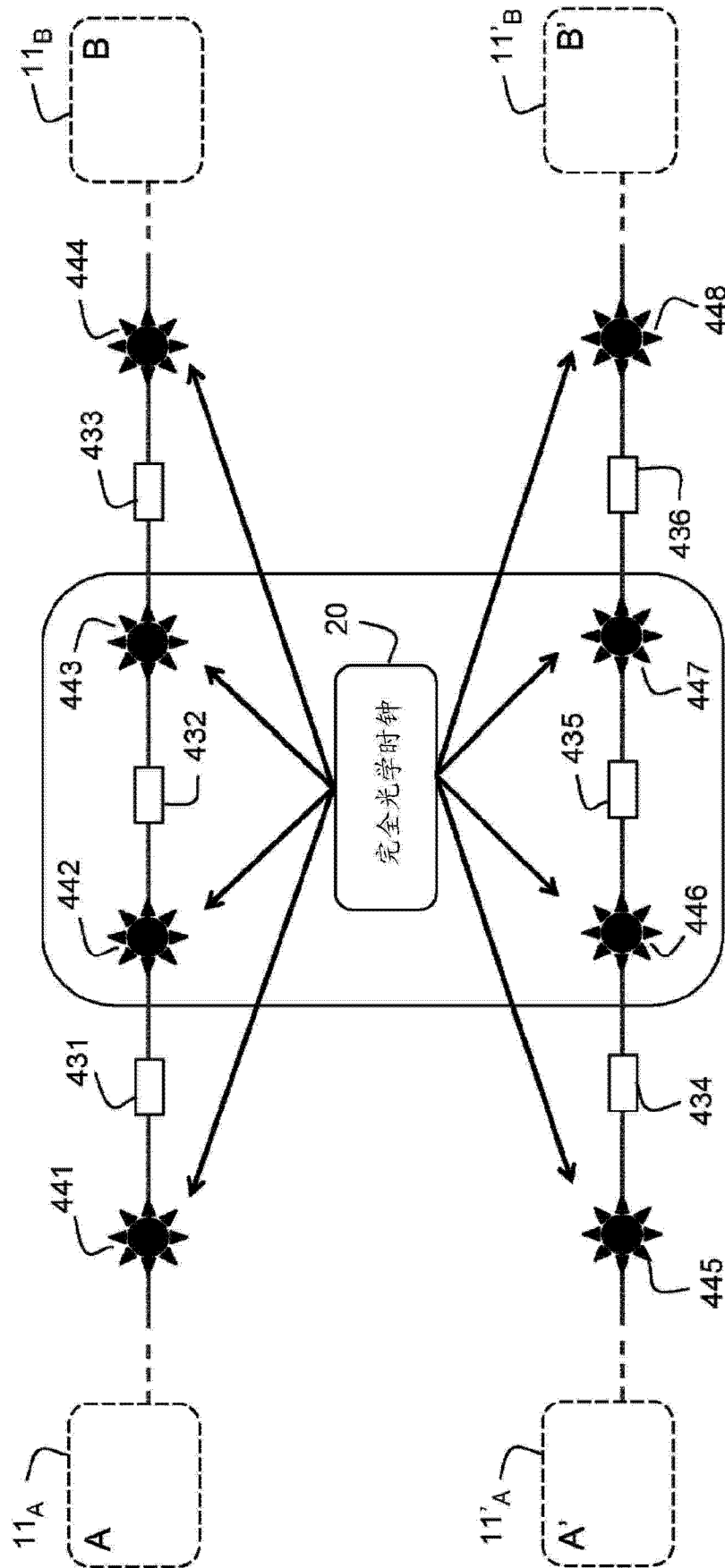


图 4