



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本

(11)證書號數：TW I766951 B

(45)公告日：中華民國 111 (2022) 年 06 月 11 日

(21)申請案號：107106735

(22)申請日：中華民國 107 (2018) 年 03 月 01 日

(51)Int. Cl. : **H04B10/70 (2013.01)****H04B10/25 (2013.01)**

(30)優先權：2017/03/01 美國

62/465,423

(71)申請人：美商康寧公司 (美國) CORNING INCORPORATED (US)

美國

(72)發明人：李 明軍 LI, MING-JUN (US)；諾蘭 丹尼爾艾洛伊修斯 NOLAN, DANIEL

ALOYSIUS (US)

(74)代理人：李世章；彭國洋

(56)參考文獻：

EP 1257076A1

JP 2005173530A

US 9313180B1

US 2010/0226659A1

US 2014/0355998A1

WO 2016/204847A2

審查人員：程敦睿

申請專利範圍項數：15 項 圖式數：6 共 58 頁

(54)名稱

具有色散補償光纖鏈結的量子通訊系統

(57)摘要

一種量子通訊系統包括：量子鍵產生系統，具有光子量子位元產生器、色散補償光纖鏈結及光子偵測單元；通訊網路，具有訊號產生器、訊號通道及訊號接收器。該色散補償光纖鏈結延伸於該光子量子位元產生器及該光子偵測單元之間且光學耦接該光子量子位元產生器及該光子偵測單元。進一步地，該色散補償光纖鏈結在結構上被配置為以約 9

$$9 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$$

或更少的絕對色散率誘發色散及以約 0.18 dB/Km 或更少的衰減率誘發衰減，使得可使用至少約 10 吉位元/秒 (Gbit/sec) 的位元率在該光子偵測單元處接收由該一或更多個光子量子位元產生器所輸出的複數個光子的量子鍵位元資訊。

A quantum communications system includes a quantum key generation system having a photonic quantum bit generator, a dispersion compensating optical fiber link, and a photon detector unit and a communications network having a signal generator, a signal channel, and a signal receiver. The dispersion compensating optical fiber link extends between and optically couples the photonic quantum bit generator and the photon detector unit. Further, the dispersion compensating optical fiber link is structurally configured to induce dispersion at an absolute dispersion rate of about 9ps/(nm)km or less and induce attenuation at an attenuation rate of about 0.18 dB/Km or less such that the quantum key bit information of a plurality of photons output by the one or more photonic quantum bit generators is receivable at the photon detector unit at a bit rate of at least about 10 Gbit/sec.

指定代表圖：

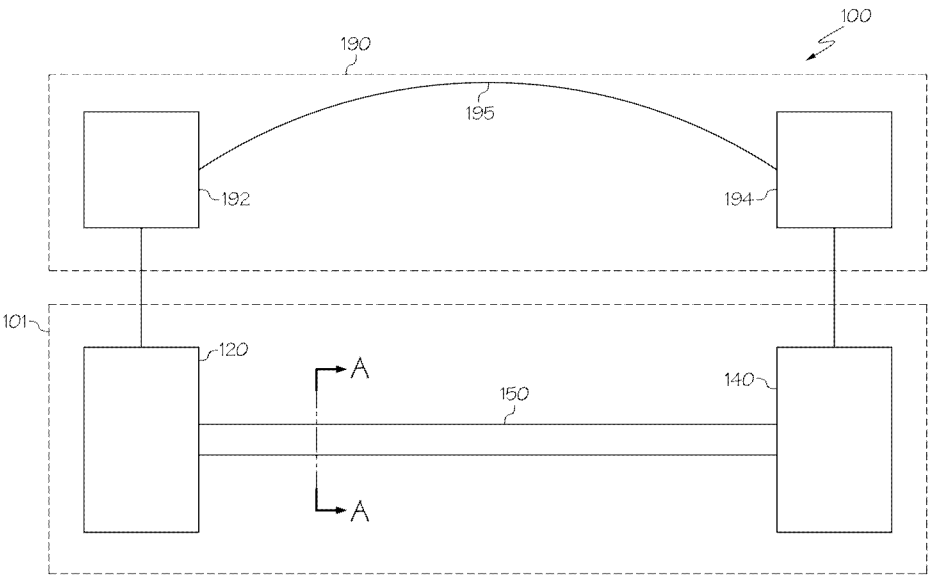


圖1

符號簡單說明：

- 100 . . . 量子通訊系統
- 101 . . . 量子鍵產生系統
- 120 . . . 光子量子位元產生器
- 140 . . . 光子偵測單元
- 150 . . . 色散補償光纖鏈結
- 190 . . . 通訊網路
- 192 . . . 訊號產生器
- 194 . . . 訊號接收器
- 195 . . . 訊號通道



I766951

【發明摘要】

【中文發明名稱】具有色散補償光纖鏈結的量子通訊系統

【英文發明名稱】QUANTUM COMMUNICATION SYSTEMS HAVING
DISPERSION COMPENSATING OPTICAL FIBER LINKS

【中文】

一種量子通訊系統包括：量子鍵產生系統，具有光子量子位元產生器、色散補償光纖鏈結及光子偵測單元；通訊網路，具有訊號產生器、訊號通道及訊號接收器。該色散補償光纖鏈結延伸於該光子量子位元產生器及該光子偵測單元之間且光學耦接該光子量子位元產生器及該光子偵測單元。進一步地，該色散補償光纖鏈結在結構上被配置為以約 $9\text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少的絕對色散率誘發色散及以約 0.18 dB/Km 或更少的衰減率誘發衰減，使得可使用至少約 10 Gbit/sec 的位元率在該光子偵測單元處接收由該一或更多個光子量子位元產生器所輸出的複數個光子的量子鍵位元資訊。

【英文】

A quantum communications system includes a quantum key generation system having a photonic quantum bit generator, a dispersion compensating optical fiber link, and a photon detector unit and a communications network having a signal generator, a signal channel, and a signal receiver. The dispersion compensating optical fiber link extends between and optically couples the photonic quantum bit generator and the photon detector unit. Further, the dispersion compensating optical fiber link is structurally

configured to induce dispersion at an absolute dispersion rate of about $9\text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ or less and induce attenuation at an attenuation rate of about 0.18 dB/Km or less such that the quantum key bit information of a plurality of photons output by the one or more photonic quantum bit generators is receivable at the photon detector unit at a bit rate of at least about 10 Gbit/sec .

【指定代表圖】第（ 1 ）圖。

【代表圖之符號簡單說明】

1 0 0 量 子 通 訊 系 統

1 0 1 量 子 鍵 產 生 系 統

1 2 0 光 子 量 子 位 元 產 生 器

1 4 0 光 子 偵 測 單 元

1 5 0 色 散 補 償 光 纖 鏈 結

1 9 0 通 訊 網 路

1 9 2 訊 號 產 生 器

1 9 4 訊 號 接 收 器

1 9 5 訊 號 通 道

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】具有色散補償光纖鏈結的量子通訊系統

【英文發明名稱】QUANTUM COMMUNICATION SYSTEMS HAVING
DISPERSION COMPENSATING OPTICAL FIBER LINKS

【技術領域】

【0001】 此申請案主張於2017年3月1日所提出之第62/465,423號美國臨時專利申請案的優先權權益，該申請案的整體內容於本文中如同於下文中被完全闡述地以引用方式依附及併入本文中。

【0002】 本揭示案關於具有色散補償光纖鏈結的量子通訊系統。更具體而言，本揭示案關於包括量子鍵產生系統的量子通訊系統，該量子鍵產生系統具有使用色散補償光纖鏈結來光學耦接的元件以供提供增加的量子鍵位元率。

【先前技術】

【0003】 先前技術的缺陷仍然存在著。此發明針對解決此類缺陷及/或相對於先前技術提供改良。

【發明內容】

【0004】 依據本揭示案的標的，一種量子通訊系統包括：一量子鍵產生系統，具有一光子量子位元產生器、一色散補償光纖鏈結及一光子偵測單元；一通訊網路，具有一訊號產生器、一訊號通道及一訊號接收器。該色散補償光纖鏈結延伸於該光子量子位元產生器及該光子偵測單元之間且光學耦接該光子量子位元產生器及該光子偵測

單元。該光子量子位元產生器在結構上被配置為輸出複數個光子，該複數個光子中的各個光子包括量子鍵位元資訊。該光子偵測單元在結構上被配置為接收該複數個光子的該量子鍵位元資訊。該訊號通道延伸於該訊號產生器及該訊號接收器之間且通訊耦接該訊號產生器及該訊號接收器。該訊號產生器在結構上被配置為輸出包括一或更多個訊號位元的一訊號。該訊號接收器通訊耦接到該光子偵測單元且在結構上被配置為在接收該訊號之後將該一或更多個訊號位元與該量子鍵位元資訊進行比較。進一步地，該色散補償光纖鏈結包括一核心及圍繞該核心的一包覆層，且在結構上被配置為以約 $9\text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少的一絕對色散率誘發包括約 1550 nm 的一波長的一光子的色散及以約 0.18 dB/Km 或更少的一衰減率誘發包括約 1550 nm 的該波長的該光子的衰減，使得可使用至少約 $10\text{ 吉位元/秒 (Gbit/sec)}$ 的一位元率在該光子偵測單元處接收由該光子量子位元產生器所輸出的該複數個光子的該量子鍵位元資訊。

【0005】 依據本揭示案的一個實施例，一種量子鍵產生系統包括：一色散補償光纖鏈結，延伸於一光子量子位元產生器及一光子偵測單元之間且光學耦接該光子量子位元產生器及該光子偵測單元。該色散補償光纖鏈結具有一核心及圍繞該核心的一包覆層，且在結構上被配置為以約 $9\text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少的一絕對色散率誘發包括約 1550 nm 的一波長的一光子的色散及以約 0.18 dB/Km 或更少的

一衰減率誘發包括約 1550 nm 的該波長的該光子的衰減，使得可使用至少約 10 吉位元/秒 (Gbit/sec) 的一位元率在該光子偵測單元處接收由該光子量子位元產生器所輸出的複數個光子的量子鍵位元資訊。

【0006】 依據本揭示案的又另一實施例，一種量子鍵產生系統包括：兩個光子纏結鏈；複數個色散補償光纖鏈結；及兩個光子偵測單元。各個光子纏結鏈延伸於該兩個光子偵測單元之間。各個光子纏結鏈包括使用該複數個色散補償光纖鏈結來光學耦接的至少一個光子量子位元產生器及第一終端量子記憶體及第二終端量子記憶體。該第一終端量子記憶體及該第二終端量子記憶體分別定位在該等光子纏結鏈的第一端及第二端處。該兩個光子纏結鏈中的各者的該第一終端量子記憶體及該第二終端量子記憶體分別形成第一交叉鏈量子中繼器及第二交叉鏈量子中繼器，以在該等交叉鏈量子中繼器處產生可量測的經纏結粒子。進一步地，該第一光子偵測單元及該第二光子偵測單元在結構上被配置為分別接收由該第一交叉鏈量子中繼器及該第二交叉鏈量子中繼器所產生的該等可量測的經纏結粒子。

【0007】 儘管在本文中主要參照量子鍵產生來描述本揭示案的概念，考慮到該等概念將享有對於任何量子資訊通訊的可應用性。

【圖式簡單說明】

【0008】 在與以下繪圖結合閱讀時，可最佳地瞭解本揭示案的特定實施例的以下詳細說明，在該等繪圖中，類似的結構以類似的參考標號指示，且在該等繪圖中：

【0009】 圖1示意性地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的量子通訊系統，該量子通訊系統包括量子鍵產生系統及通訊網路；

【0010】 圖2示意性地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的一對光子脈衝；

【0011】 圖3A示意性地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的圖1的色散補償光纖鏈結的實施例的橫截面圖；

【0012】 圖3B圖解地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的作為圖3A的色散補償光纖鏈結的半徑的函數的折射率；

【0013】 圖4A示意性地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的圖1的色散補償光纖鏈結的另一實施例的橫截面圖；

【0014】 圖4B圖解地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的作為圖4A的色散補償光纖鏈結的半徑的函數的折射率；

【0015】 圖5A示意性地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的量子鍵產生系統，該量子鍵產生系統具有包括量子中繼器的光子量子位元產生器；

【0016】圖5B示意性地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的量子鍵產生系統，該量子鍵產生系統具有包括經纏結光子產生器的光子量子位元產生器；

【0017】圖5C示意性地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的另一量子鍵產生系統，該量子鍵產生系統具有包括經纏結光子產生器的光子量子位元產生器；及

【0018】圖6示意性地描繪依據本文中所示出及描述的一或更多個實施例的量子鍵產生系統，該量子鍵產生系統被配置為在沒有光子纏結的情況下傳播量子鍵位元資訊。

【實施方式】

【0019】現參照圖1，示意性地描繪了包括量子鍵產生系統101及通訊網路190的量子通訊系統100。量子鍵產生系統101包括光子量子位元產生器120、光子偵測單元140及色散補償光纖鏈結150，該色散補償光纖鏈結延伸於光子量子位元產生器120及光子偵測單元140之間且耦接該光子量子位元產生器及該光子偵測單元。通訊網路190包括訊號產生器192、訊號接收器194及訊號通道195，該訊號通道延伸於訊號產生器192及訊號接收器194之間且耦接該訊號產生器及該訊號接收器。進一步地，訊號接收器194通訊耦接到光子偵測單元140，而將量子鍵產生系統101通訊耦接到通訊網路190。

【0020】 仍參照圖1，量子鍵產生系統101的光子量子位元產生器120在結構上被配置為輸出複數個光子，各個光子包括量子鍵位元，而光子偵測單元140在結構上被配置為在接收該複數個光子中的至少一者之後決定量子鍵位元資訊。量子鍵位元資訊可包括密碼金鑰，該密碼金鑰可用來解碼使用通訊網路190來傳輸的經加密的信息。進一步地，通訊網路190的訊號產生器192在結構上被配置為輸出訊號，該訊號包括一或更多個訊號位元，該等訊號位元可包括經加密信息的一部分，而訊號接收器194在結構上被配置為在接收訊號之後將該一或更多個訊號位元與量子鍵位元資訊進行比較，以例如使用包括量子鍵位元資訊的密碼金鑰來解碼經加密信息。在某些實施例中，量子鍵產生系統101可為具有一或更多個量子中繼器的基於纏結的量子鍵產生系統201，該量子鍵產生系統201使用光子纏結來傳播量子鍵位元資訊（圖5A-5C），且在其他實施例中，量子鍵產生系統101可在沒有光子纏結的情況下傳播量子鍵位元資訊（例如量子鍵產生系統301（圖6））。

【0021】 操作時，包括量子鍵位元的該複數個光子可橫越光子量子位元產生器120及光子偵測單元140之間的色散補償光纖鏈結150。色散補償光纖鏈結150在結構上被配置為誘發橫越色散補償光纖鏈結150的複數個光子的色散，使得橫越色散補償光纖鏈結150的該複數個光子的各個光子的時間性脈衝寬度小於相鄰光子之間的脈衝

間隔距離。如本文中所使用的，「時間性脈衝寬度」是各個光子脈衝的尖峰強度的半峰全寬（full width half maximum, FWHM）。進一步地，如本文中所使用的，「脈衝間隔距離」是相鄰的光子脈衝的脈衝中心之間的距離，其中脈衝中心與各個光子脈衝的尖峰強度相對應。例如，在某些實施例中，色散補償光纖鏈結150可在結構上被配置為在不重疊相鄰的光子脈衝的情況下最大化各個光子脈衝的時間性脈衝寬度的加寬。

【0022】 現參照圖2，示意性地描繪了第一光子脈衝102的時間性脈衝寬度 W_{P1} 及第二光子脈衝104的時間性脈衝寬度 W_{P2} 。第一光子脈衝102及第二光子脈衝104為由光子量子位元產生器120所輸出的示例光子，該等光子被相鄰地定位且正沿著色散補償光纖鏈結150傳播。第一光子脈衝102包括與第一光子脈衝102的尖峰強度相對應的脈衝中心103，而第二光子脈衝104包括與第二光子脈衝104的尖峰強度相對應的脈衝中心105。進一步地，第一光子脈衝102的脈衝中心103與第二光子脈衝104的脈衝中心105相隔脈衝間隔距離 D_P 。如圖2A中所示，第一光子脈衝102及第二光子脈衝104之間的脈衝間隔距離大於各個光子脈衝102、104的時間性脈衝寬度 W_{P1} 、 W_{P2} ，使得第一光子脈衝102及第二光子脈衝104並不重疊。作為一非限制性實例，時間性脈衝寬度可從約20 ps到約200 ps，例如約30 ps、40 ps、50 ps、60 ps、70 ps、80 ps、90 ps、100 ps、110 ps、

120 ps、120 ps、130 ps、140 ps、150 ps、160 ps、170 ps、180 ps、190 ps 等等。

【0023】 現參照圖3A-4B，更詳細地描繪了色散補償光纖鏈結150。圖3A及4A各描繪圖1沿著線A-A的色散補償光纖鏈結150的實施例的橫截面。具體而言，圖3A描繪色散補償光纖鏈結150'，該色散補償光纖鏈結包括核心152及圍繞核心152的包覆層154。圖4A描繪色散補償光纖鏈結150''，該色散補償光纖鏈結亦包括核心152及圍繞核心152的包覆層154，且更包括安置在包覆層154內的包覆環155，該包覆環將包覆層154分成定位在包覆環155及核心152之間的第一包覆部分154a以及第二包覆部分154b。進一步地，圖3B及4B各描繪分別作為圖3A及3B的色散補償光纖鏈結150'、150''的半徑的函數的折射率的圖解。

【0024】 再次參照圖3A及4A，核心152可包括石英玻璃、聚合物等等，且可摻有K、Cl、F或其組合。儘管不是要受理論所限，但給核心152摻雜可減少核心152的黏度及假定溫度。包覆層154包括外包覆面156，且可包括純矽石、摻F的矽石、F（氟）/B（硼）共摻的矽石、低折射率（low index）聚合物等等。將包覆層154摻有F可降低包覆層154的折射率。進一步地，包覆層154包括較核心152為低的折射率，以促進傳播透過色散補償光纖鏈結150的複數個光子的全內反射。

【0025】 在圖3A及4A中所描繪的實施例中，色散補償光纖鏈結150'、150''包括單個核心152，然而，在其他實施例中，色散補償光纖鏈結150'、150''可包括多個核心。在包括多個核心的實施例中，多個核心可為紡成的，且色散補償光纖鏈結150可包括任何螺旋配置，例如單向螺旋配置、雙向螺旋配置等等。進一步地，在某些實施例中，色散補償光纖鏈結150'、150''可包括步進的折射率剖線、拋物線的折射率剖線、遞變的折射率剖線、三角形的折射率剖線等等。

【0026】 再次參照圖3A及3B，色散補償光纖鏈結150'的核心152可包括從約 $1.5\ \mu\text{m}$ 到約 $5\ \mu\text{m}$ 的半徑 $R_{\text{核}}$ 心，例如 $2\ \mu\text{m}$ 到約 $4\ \mu\text{m}$ 、 $2.2\ \mu\text{m}$ 到約 $3\ \mu\text{m}$ 等等。例如， $2.23\ \mu\text{m}$ 、 $2.28\ \mu\text{m}$ 、 $2.3\ \mu\text{m}$ 、 $2.35\ \mu\text{m}$ 、 $2.4\ \mu\text{m}$ 、 $2.45\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.55\ \mu\text{m}$ 、 $2.58\ \mu\text{m}$ 、 $2.6\ \mu\text{m}$ 、 $2.65\ \mu\text{m}$ 、 $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $2.75\ \mu\text{m}$ 、 $2.8\ \mu\text{m}$ 、 $2.85\ \mu\text{m}$ 、 $2.9\ \mu\text{m}$ 、 $2.95\ \mu\text{m}$ 等等。色散補償光纖鏈結150'的核心152包括折射率 n_1 及相對折射率 Δ_1 （其相對於純矽石的折射率 n_s ，且標誌純矽石及核心152之間的折射率改變）。相對折射指數 Δ_1 包括 $(n_1 - n_s)/n_s$ 。如上所述，核心152可為了低損耗而為純的石英玻璃或摻有C1或K或F的玻璃。作為非限制性實例，相對折射率 Δ_1 可從約-0.1到約0.2等等，例如-0.1、-0.05、0、0.05、0.1、0.15等等。包覆層154包括折射率 n_2 及相對折射率 Δ_2 （其相對於純矽石的折射率 n_s ，且標誌純矽石及核心152之間的折射率改

變)。相對折射指數 Δ_2 包括 $(n_2 - n_s)/n_s$ 。進一步地， $n_2 < n_1$ 及 $\Delta_2 < \Delta_1$ 。作為非限制性實例，相對折射率 Δ_2 可從約 -0.4 到約 -0.7 等等，例如 -0.45、-0.5、-0.55、-0.6、-0.65 等等。

【0027】 進一步地，色散補償光纖鏈結 150' 包括核心 152 及包覆層 154 之間從約 0.3 到約 0.8 的相對折射率改變 Δ ，其中 $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$ 。作為非限制性實例，折射率改變 Δ 可從約 0.4 到約 0.7、0.5 到約 0.65 等等，例如 0.35、0.4、0.45、0.5、0.55、0.6、0.65、0.7、0.75 等等。進一步地，包括核心 152 中的摻雜物，包覆層 154 或兩者（例如上摻雜物（*up dopant*）或下摻雜物（*down dopant*））可變更核心 152 及包覆層 154 之間的相對折射率，亦即變更折射率改變 Δ 。如本文中所使用的，「上摻雜物」是相對於純的未摻雜的 SiO_2 具有升高折射率的傾向的摻雜物，而「下摻雜物」是相對於純的未摻雜的 SiO_2 具有降低折射率的傾向的摻雜物。

【0028】 仍參照圖 3A 及 3B，色散補償光纖鏈結 150' 可包括約 1200 nm 或更少的截止波長，例如 1150 nm、1100 nm、1050 nm、1031 nm、1025 nm、1000 nm、975 nm、973 nm、950 nm、929 nm、925 nm、915 nm、911 nm、909 nm、905 nm、900 nm、875 nm、850 nm、825 nm、800 nm 等等。儘管不是要受理論所限，但截止波長是一種波長，在該波長以上，受引導的高次模（*higher order mode*）在核心 152

內不再受支援，且核心 152 變成僅支援基模的單模核心。操作時，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 150' 傳播時，色散補償光纖鏈結 150' 誘發從約 6.5 μm 到約 10 μm 的模場直徑，例如約 7 μm 到約 9.5 μm 、7.5 μm 到約 9.0 μm 、7 μm 到約 8.5 μm 等等，例如 6 μm 、6.5 μm 、7 μm 、7.5 μm 、8 μm 、8.5 μm 、9 μm 、9.5 μm 、10 μm 等等。儘管不是要受理論所限，但模場直徑是色散補償光纖鏈結 150' 的核心 152 的基模的光強度分佈的橫向程度。

【0029】進一步地，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 150' 傳播時，色散補償光纖鏈結 150' 誘發從約 30 μm^2 到約 70 μm^2 的有效面積，例如約 35 μm^2 到約 60 μm^2 、約 40 μm^2 到約 55 μm^2 、從約 45 μm^2 到約 50 μm^2 等等，例如 30 μm^2 、35 μm^2 、40 μm^2 、45 μm^2 、50 μm^2 、55 μm^2 、60 μm^2 、65 μm^2 、70 μm^2 、75 μm^2 、80 μm^2 等等。儘管不是要受理論所限，但有效面積是一種橫截面積，在該橫截面積上，沿著色散補償光纖鏈結 150' 傳播的光的基模的電場的能量被分佈在核心 152 內。例如，單模光纖的有效面積與核心 152 在不誘發非線性類型的訊號懲罰的情況下可承載的最大能量相關。

【0030】仍參照圖 3A 及 3B，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 150' 傳播時，色散補償光纖鏈結 150' 誘發約 9 ps/(nm)km 或更少的絕

對色散率的該一或更多個光子的色散，例如約 $8.6 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $8.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $8 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $7.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $7 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $6.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $6 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $5.7 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $5.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $4.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $4.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $4 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $3.6 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $3.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $3 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $2.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $2 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $1.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $1.1 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 、 $1 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $0.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $0.1 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少等等。儘管不是要受理論所限，但絕對色散率是光子脈衝從脈衝中心 103（圖 2）向外擴散的速率，例如光子脈衝的時間性脈衝寬度的增加速率。

【0031】進一步地，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 150' 傳播時，色散補償光纖鏈結 150' 誘發從約 $0.05 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 到約 $0.055 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 的色散斜率，例如約 $0.051 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 到約 $0.054 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ ，例如約 $0.0515 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0516 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0518 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.052 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0521 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0525 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.053 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0535 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0538 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 等等。儘管不是要受理論所限，但色散斜率是絕對色散率隨著波長而改變的速率。對於寬廣的波長窗上的扁平色散而言可能需要較小的色散斜率。並且，在包括約 1550 nm

的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結150'傳播時，色散補償光纖鏈結150'誘發約0.2 dB/Km或更少的衰減率，例如約0.18 dB/Km或更少，例如約0.17 dB/Km、0.16 dB/Km、0.15 dB/Km、0.14 dB/Km、0.13 dB/Km、0.12 dB/Km等等。儘管不是要受理論所限，但衰減率是沿著色散補償光纖鏈結150'傳播的複數個光子的強度損耗（例如光子損耗）的速率。

【0032】 以下的表格1及2各列舉圖3A及3B的色散補償光纖鏈結150'的示例的屬性。

【0033】 表格1：

	第一示例色散補償光纖鏈結150'	第二示例色散補償光纖鏈結150'	第三示例色散補償光纖鏈結150'
核心材料	純矽石	純矽石	純矽石
相對折射率 Δ_1	0	0	0
相對折射率 Δ_2	-0.5	-0.55	-0.6
折射率剖線	步進	步進	步進
核心半徑 $R_{\text{核心}}$ (μm)	2.9	2.58	2.5
截止波長 (nm)	1031	948	972
1550 nm下的模場直徑 (μm)	8.5	8.3	7.8
1550 nm下的有效面積 (μm^2)	53.8	51.1	45.4
1550 nm下的絕對	8.6	5.7	3.6

色 散 率 ($ps/(nm)km$)			
1550 nm下的色散 斜 率 ($ps/(nm^2)km$)	0.053	0.0518	0.0516
1550 nm下的衰減 率 (dB/Km)	0.17或更少	0.17或更少	0.17或更少

【 0 0 3 4 】 表 格 2：

	第四示例色散補 償光纖鏈結150'	第五示例色散補 償光纖鏈結150'	第六示例色散補 償光纖鏈結150'
核心材料	純矽石	摻氮的矽石	摻氮的矽石
相對折射率 Δ_1	0	0.1	0.15
相對折射率 Δ_2	-0.65	-0.5	-0.5
折射率剖線	步進	步進	步進
核 心 半 徑 $R_{核 心}$ (μm)	2.28	2.35	2.23
截止波長 (nm)	929	911	909
1550 nm下的模場 直徑 (μm)	7.6	8.0	7.6
1550 nm下的有效 面積 (μm^2)	42.8	47	43.4
1550 nm下的絕對 色 散 率 ($ps/(nm)km$)	0.1	1.1	-0.8

1550 nm下的色散 斜 率 (ps/ (nm ²)km)	0.0521	0.0538	0.0530
1550 nm下的衰減 率 (dB/Km)	0.17或更少	0.17或更少	0.17或更少

【 0 0 3 5 】 現 參 照 圖 4 A 及 4 B ， 示 意 性 地 描 繪 （ 圖 4 A ） 及 圖 解 地 描 繪 （ 圖 4 B ） 了 包 括 安 置 在 包 覆 層 1 5 4 內 在 第 一 包 覆 部 分 1 5 4 a 及 第 二 包 覆 部 分 1 5 4 b 之 間 的 包 覆 環 1 5 5 的 色 散 補 償 光 纖 鏈 結 1 5 0 '' 。 色 散 補 償 光 纖 鏈 結 1 5 0 '' 的 核 心 1 5 2 可 包 括 從 約 1 . 5 μ m 到 約 5 μ m 的 半 徑 R 核 心 ， 例 如 2 μ m 到 約 4 μ m 、 2 . 2 μ m 到 約 3 μ m 、 2 . 2 μ m 到 約 2 . 8 μ m 等 等 ， 例 如 2 . 2 3 μ m 、 2 . 2 8 μ m 、 2 . 3 μ m 、 2 . 3 5 μ m 、 2 . 4 μ m 、 2 . 4 5 μ m 、 2 . 5 μ m 、 2 . 5 5 μ m 、 2 . 5 8 μ m 、 2 . 6 μ m 、 2 . 6 5 μ m 、 2 . 7 μ m 、 2 . 7 5 μ m 、 2 . 8 μ m 、 2 . 8 5 μ m 、 2 . 9 μ m 、 2 . 9 5 μ m 等 等 。 色 散 補 償 光 纖 鏈 結 1 5 0 '' 的 第 一 包 覆 部 分 1 5 4 a 包 括 從 第 一 包 覆 部 分 1 5 4 a 及 包 覆 環 1 5 5 的 介 面 量 測 到 的 從 約 3 μ m 到 約 1 2 μ m 的 半 徑 R 包 覆 ， 例 如 約 4 μ m 到 約 1 0 μ m 、 4 . 5 μ m 到 8 . 8 μ m 等 等 ， 例 如 3 μ m 、 4 μ m 、 4 . 5 μ m 、 5 μ m 、 6 μ m 、 7 μ m 、 8 μ m 、 8 . 8 μ m 、 9 μ m 、 1 0 μ m 、 1 1 μ m 、 1 2 μ m 等 等 。 仍 參 照 圖 4 A 及 4 B ， 色 散 補 償 光 纖 鏈 結 1 5 0 '' 的 包 覆 環 1 5 5 包 括 從 包 覆 環 1 5 5 及 第 二 包 覆 部 分 1 5 4 b 的 介 面 量 測 到 的 從 約 7 μ m 到 約 1 3 μ m 的 半 徑 R 環 ， 例 如 8 μ m 到 約 1 2 μ m 及 約 9 μ m 到 約 1 1 . 5 μ m 等 等 ， 例 如 7

μm 、 $7.5\ \mu\text{m}$ 、 $8\ \mu\text{m}$ 、 $8.5\ \mu\text{m}$ 、 $9\ \mu\text{m}$ 、 $9.5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $10.5\ \mu\text{m}$ 、 $11\ \mu\text{m}$ 、 $11.4\ \mu\text{m}$ 、 $11.5\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 、 $12.5\ \mu\text{m}$ 、 $13\ \mu\text{m}$ 等等。

【0036】 仍參照圖4A及4B，色散補償光纖鏈結150''的核心152包括折射率 n_1 及相對折射率 Δ_1 （其相對於純矽石的折射率 n_s ，且標誌純矽石及核心152之間的折射率改變）。相對折射指數 Δ_1 包括 $(n_1 - n_s)/n_s$ 。第一包覆部分154a包括折射率 n_2 及相對折射率 Δ_2 （其相對於純矽石的折射率 n_s ，且標誌純矽石及第一包覆部分154a之間的折射率改變）。相對折射指數 Δ_2 包括 $(n_2 - n_s)/n_s$ 。包覆環155包括折射率 n_3 及相對折射率 Δ_3 （其相對於純矽石的折射率 n_s ，且標誌純矽石及包覆環155之間的折射率改變）。相對折射指數 Δ_3 包括 $(n_3 - n_s)/n_s$ 。第二包覆部分154b包括折射率 n_4 及相對折射率 Δ_4 （其相對於純矽石的折射率 n_s ，且標誌純矽石及第二包覆部分154b之間的折射率改變）。相對折射指數 Δ_4 包括 $(n_4 - n_s)/n_s$ 。

【0037】 進一步地， $n_1 > n_3 > n_4 > n_2$ 及 $\Delta_1 > \Delta_3 > \Delta_4 > \Delta_2$ 。如上所述，核心152可為了低損耗而為純的石英玻璃或摻有C1或K或F的玻璃。作為非限制性實例，相對折射率 Δ_1 可從約-0.1到約0.2，例如-0.1、-0.05、0、0.05、0.1、0.15等等。第一包覆部分154a、包覆環155及第二包覆部分154b可各包括摻有F的玻璃（例如石英玻璃）以供降低它們各別的折射率。作為非限制性實例，相對折射率 Δ_2 可從約-0.2到約-0.7等等，例如-0.25、0.3、0.35、

-0.45、-0.5、-0.55、-0.6、-0.65 等等。作為非限制性實例，相對折射率 Δ_3 可從約 -0.1 到約 -0.5 等等，例如 -0.15、-0.2、-0.25、-0.3、-0.35、-0.4、-0.45 等等。作為非限制性實例，相對折射率 Δ_4 可從約 -0.2 到約 -0.6 等等，例如 -0.25、0.3、0.35、-0.45、-0.5、-0.55、-0.6 等等。

【0038】色散補償光纖鏈結 150'' 包括核心 152 及第一包覆部分 154a 之間從約 0.2 到約 0.6 的折射率改變 Δ' ，其中 $\Delta' = \Delta_1 - \Delta_2$ 。在某些實施例中，折射率改變 Δ' 可從約 0.4 到約 0.5，例如 0.25、0.3、0.35、0.4、0.41、0.43、0.45、0.47、0.49、5、5.5 等等。色散補償光纖鏈結 150'' 亦包括第一包覆部分 154a 及包覆環 155 之間從約 0 及約 0.2 的折射率改變 Δ'' (亦即包覆環 155 的折射率可高於第一包覆部分 154a 的折射率)，其中 $\Delta'' = \Delta_3 - \Delta_2$ 。在某些實施例中，折射率改變 Δ'' 可為約 0.02、0.05、0.1、0.12、0.15、0.18 等等。並且，色散補償光纖鏈結 150'' 包括第一包覆部分 154a 及第二包覆部分 154b 之間從約 0 到約 0.1 的折射率改變 Δ''' (亦即第二包覆部分 154b 的折射率可高於第一包覆部分 154a 的折射率)，其中 $\Delta''' = \Delta_4 - \Delta_2$ 。在某些實施例中，折射率改變 Δ''' 可為約 -0.02、-0.04、-0.05、-0.1 等等。

【0039】色散補償光纖鏈結 150'' 可包括約 1600 nm 或更少、1500 nm 或更少、1350 nm 或更少等等的截止波長，例如 1550 nm、1516 nm、1500 nm、1464 nm、

1450 nm、1403 nm、1400 nm、1384 nm、1350 nm、1300 nm、1250 nm、1200 nm、1150 nm、1100 nm、1050 nm、1000 nm、950 nm、900 nm、850 nm、800 nm 等等。進一步地，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 150'' 傳播時，色散補償光纖鏈結 150'' 誘發包括約 1550 nm 的波長的光子的從約 8 μm 到約 12 μm 的模場直徑，例如約 9 μm 到約 11 μm 、9.5 μm 到約 10.5 μm 等等，例如 8 μm 、8.5 μm 、9 μm 、9.5 μm 、9.9 μm 、10 μm 、10.1 μm 、10.2 μm 、10.5 μm 、11 μm 、11.5 μm 、12 μm 等等。

【0040】 進一步地，在某些實施例中，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 150'' 傳播時，色散補償光纖鏈結 150'' 誘發從約 50 μm^2 到約 100 μm^2 、60 μm^2 到約 90 μm^2 、70 μm^2 到約 80 μm^2 等等的有效面積，例如 50 μm^2 、55 μm^2 、60 μm^2 、65 μm^2 、70 μm^2 、73.5 μm^2 、74.3 μm^2 、75 μm^2 、76.8 μm^2 、78.7 μm^2 、80 μm^2 、85 μm^2 、90 μm^2 、95 μm^2 、100 μm^2 等等。進一步地，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 150'' 傳播時，色散補償光纖鏈結 150'' 以約 9 ps/(nm)km 或更少的絕對色散率誘發色散，例如約 8.6 ps/(nm)km 或更少、8.5 ps/(nm)km 或更少、8 ps/(nm)km 或更少、7.5 ps/(nm)km 或更少、7 ps/(nm)km 或更少、6.5 ps/(nm)km 或更少、6 ps/(nm)km

或更少、 $5.7 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $5.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $4.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $4.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $4 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $3.8 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 、 $3.6 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $3.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $3 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $2.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $2 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $1.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $1.1 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 、 $1 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $0.5 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少、 $0.1 \text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少等等。

【0041】 在某些實施例中，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 $150''$ 傳播時，色散補償光纖鏈結 $150''$ 以從約 $0.05 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 到約 $0.1 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.055 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 到約 $0.085 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 等等的色散斜率誘發色散，例如約 $0.0525 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.055 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0564 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0575 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.06 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0625 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0645 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.065 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0675 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0676 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.07 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0725 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.075 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0775 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.08 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0825 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.0834 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 、 $0.085 \text{ ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 等等。

【0042】 並且，在包括約 1550 nm 的波長的一或更多個光子沿著色散補償光纖鏈結 $150''$ 傳播時，色散補償光纖鏈結 $150''$ 以約 0.2 dB/Km 或更少的衰減率誘發衰減，例如約 0.18 dB/Km 或更少，例如約 0.17 dB/Km 、

0.16 dB/Km、0.15 dB/Km、0.14 dB/Km、0.13 dB/Km、0.12 dB/Km 等等。

【0043】 以下的表格3列舉了示例色散補償光纖鏈結150''的屬性。

【0044】 表格3：

	第一示例色散 補償光纖鏈結 150''	第二示例色散 補償光纖鏈結 150''	第三示例色散 補償光纖鏈結 150''	第四示例色散 補償光纖鏈結 150''
核心材料	摻氮的矽石	摻氮的矽石	摻氮的矽石	摻氮的矽石
相對折射率 Δ_1	0.15	0.15	0.15	0.15
相對折射率 Δ_2	-0.28	-0.28	-0.3	-0.34
相對折射率 Δ_3	-0.15	-0.16	-0.15	-0.34
相對折射率 Δ_4	-0.28	-0.28	-0.3	-0.4
折射率剖線	步進	步進	步進	步進
核心半徑 $R_{\text{核心}}$ (μm)	2.8	2.8	2.7	2.2
第一包覆部分 半徑 $R_{\text{包覆}}$ (μm)	8	8.8	4.5	8
包覆環半徑 $R_{\text{環}}$ (μm)	11	11.4	11	9
截止波長 (nm)	1516	1403	1464	1384
1550 nm下的 模場直徑	10.2	9.9	10.1	9.9

(μm)				
1550 nm下的 有效面積 (μm^2)	78.7	73.5	76.8	74.3
1550 nm下的 絕對色散率 ($\text{ps}/(\text{nm})\text{km}$)	3.8	4.5	3.8	3.5
1550 nm下的 色散斜率 ($\text{ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$)	0.0645	0.0564	0.0676	0.0834
1550 nm下的 衰減率 (dB/Km)	0.17或更少	0.17或更少	0.17或更少	0.17或更少

【0045】 現參照圖5A-5C，示意性地描繪了量子鍵產生系統201的三個實施例，各個實施例被配置為使用光子纏結來傳播量子鍵位元資訊。量子鍵產生系統201的實施例中的各者包括延伸於一或更多個光子量子位元產生器220及該一或更多個光子偵測單元240之間且光學耦接該一或更多個光子量子位元產生器及該一或更多個光子偵測單元的複數個色散補償光纖鏈結150。併入色散補償光纖鏈結150可增加量子鍵產生系統201的量子鍵位元率，因為色散補償光纖鏈結150誘發傳播透過色散補償光

纖鏈結 150 的光子的低的絕對色散率及低的衰減率。具體而言，色散補償光纖鏈結 150（例如圖 3 A 及 3 B 的色散補償光纖鏈結 150' 及圖 4 A 及 4 B 的色散補償光纖鏈結 150''）被配置為使得可使用至少 10 吉位元/秒（Gbit/sec）的位元率（例如 20 吉位元/秒、30 吉位元/秒、40 吉位元/秒、50 吉位元/秒、75 吉位元/秒、100 吉位元/秒、150 吉位元/秒、200 吉位元/秒、250 吉位元/秒、500 吉位元/秒等等）在一或更多個光子偵測單元 240 處接收由該一或更多個光子量子位元產生器 220 所輸出的該複數個光子的量子鍵位元資訊。

【0046】 仍參照圖 5 A - 5 C，量子鍵產生系統 201 包括第一光子偵測單元 240 a、第二光子偵測單元 240 b 以及第一光子纏結鏈 210 a 及第二光子纏結鏈 210 b，各個光子纏結鏈延伸於第一光子偵測單元 240 a 及第二光子偵測單元 240 b 之間。光子纏結鏈 210 a、210 b 各包括定位在第一光子偵測單元 240 a 及第二光子偵測單元 240 b 之間且使用色散補償光纖鏈結 150 來光學耦接到該第一光子偵測單元及該第二光子偵測單元的該一或更多個光子量子位元產生器 220 中的至少一者。該第一光子纏結鏈 210 a 及第二光子纏結鏈 210 b 各包括第一終端量子記憶體 264 a、264 b 及第二終端量子記憶體 266 a、266 b。各個光子纏結鏈 210 a、210 b 的第一終端量子記憶體 264 a、264 b 定位在各個光子纏結鏈 210 a、210 b 的第一端 216 處且光學耦接到第一光子偵測單元 240 a，而各個光子纏

結鏈 210a、210b 的第二終端量子記憶體 266a、266b 定位在第二端 218 處且光學耦接到第二光子偵測單元 240b。進一步地，量子鍵產生系統 201 被更詳細地描述於標題為「Systems and Methods for Quantum Key Generation」的第 9,313,180 號的美國專利及標題為「Systems and Methods for Quantum Key Generation」的第 PCT/US16/24854 號的 PCT 申請案中，其整體內容特此以引用方式併入。

【0047】 現參照圖 5A 及 5B，在某些實施例中，該一或更多個光子量子位元產生器 220 可包括一或更多個經纏結光子產生器 222，該一或更多個經纏結光子產生器在結構上被配置為例如使用參數下轉換過程（parametric down conversion process）來產生經纏結光子對。經纏結光子產生器 222 可各包括光學耦接到非線性的晶體的雷射源。在其他實施例中，經纏結光子產生器 222 可在結構上被配置為使用四波混合過程或產生經纏結光子對的任何方法或過程來產生經纏結光子對。進一步地，各個經纏結光子產生器 222 可在結構上被配置為提供具有任何波長 λ （例如在約 800 nm 及約 1800 nm 之間，例如約 1550 nm）的經纏結光子。

【0048】 如圖 5A 及 5B 中所描繪，各個光子纏結鏈 210a、210b 可更包括光學耦接到該一或更多個光子量子位元產生器 220（例如該一或更多個經纏結光子產生器 222）的至少一個量子中繼器 230。各個量子中繼器 230

在結構上被配置為纏結一對光子。各個光子纏結鏈 210a、220b 的量子中繼器 230 可交錯於經纏結光子產生器 222 之間，使得各個經纏結光子產生器 222 定位在兩個量子中繼器 230 之間或定位在單個量子中繼器 230 及終端量子記憶體 264a、264b、266a、266b 中的一者之間，且各個量子中繼器 230 定位在兩個經纏結光子產生器 222 之間。作為一個實例，操作時，個別的量子中繼器 230 可接收由兩個不同的經纏結光子產生器 222 所產生的個別經纏結光子且纏結所接收的光子。進一步地，在圖 5A 中所描繪的實施例中，個別的經纏結光子產生器 222 定位在各個光子纏結鏈 210a、210b 的第一端 216 及第二端 218 之間的起源位置 214 處，且在圖 5B 中所描繪的實施例中，個別的量子中繼器 230 定位在各個光子纏結鏈 210a、210b 的第一端 216 及第二端 218 之間的起源位置處。

【0049】 仍參照圖 5A 及 5B，各個量子中繼器 230 包括兩個量子記憶體 232 及纏結光學件 234。纏結光學件 234 可包括二或更多個纏結路徑 236，該等纏結路徑光學耦接到兩個量子記憶體 232 及兩個纏結偵測器 235 且延伸於該等量子記憶體及該等纏結偵測器之間。在某些實施例中，該二或更多個纏結路徑 236 可包括波導器，例如上述的色散補償光纖鏈結 150、150'、150''。進一步地，纏結偵測器 235 可包括單光子偵測器，例如超導奈米線單光子偵測器。纏結偵測器 235 亦可包括低雜訊光電二極體。

纏結光學件 234 亦包括分束器 238，該分束器被定位為使得各個纏結路徑 236 橫越分束器 238。例如，由量子記憶體 232 所輸出的一對史托克斯光子（Stokes photon）或一對反史托克斯光子沿著纏結路徑 236 前行且可橫越分束器 238。

【0050】 儘管不是要受理論所限，但操作時，各個量子記憶體 232 被配置為接收光子（例如由經纏結光子產生器 222 或另一量子中繼器 230 所輸出的光子），且經由非線性的光學過程吸收光子，藉此將量子記憶體 232 的電子激發到激發態下。接著，在一段時間之後，電子返回基態，且光子（例如史托克斯光子或反史托克斯光子）被釋放。儘管不是要受理論所限，但在由各個量子記憶體 232 吸收及釋放光子的此過程期間，光子維持其量子性質，例如其相干性質（coherence property）。進一步地，纏結光學件 234 在結構上被配置為在由各個量子記憶體 232 所輸出的個別光子（例如史托克斯光子或反史托克斯光子）同時橫越分束器 238 時纏結光子對。

【0051】 現參照圖 5C，在某些實施例中，該一或更多個光子量子位元產生器 220 可包括一或更多個量子中繼器 230，該一或更多個量子中繼器安置在各個光子纏結鏈 210a、210b 的第一終端量子記憶體 264a、264b 及第二終端量子記憶體 266a、266b 之間。儘管一個量子中繼器 230 被安置在圖 5C 中所描繪的量子鍵產生系統 201 中所描繪的各個光子纏結鏈 210a、210b 中，但各個光子纏結

鏈 210 a、210 b 可包括相鄰地定位且使用色散補償光纖鏈結 150 來光學耦接的任何數量的量子中繼器 230。儘管不是要受理論所限，但量子中繼器 230 被配置為皆纏結及輸出光子，例如，個別的量子中繼器 230 可光學耦接到額外的量子中繼器 230 及 / 或終端量子記憶體 264 a、264 b、266 a、266 b，使得由個別量子中繼器 230 的量子記憶體 232 所釋放的光子可經由纏結光學件 234 而纏結，接著這些被釋放的光子中的至少一者（例如史托克斯或反史托克斯光子）可被相鄰的量子中繼器 230 或終端量子記憶體 264 a、264 b、266 a、266 b 接收。在該一或更多個光子量子位元產生器 220 包括量子中繼器 230 的圖 5 C 所描繪的實施例中，各個光子纏結鏈 210 a、220 b 可在結構上針對量子中繼器以 DLCZ 協定配置（例如 Duan 等人在 2001 年 11 月 22 日第 414 期的自然（Nature）期刊第 413-418 頁中所描述的及如 Sangouard 等人在 2011 年第 83 卷的現代物理學評論（Review of Modern Physics）期刊第 34-73 頁的論文「Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics」中所描述的）。

【0052】 如上文針對圖 2 所述的，色散補償光纖鏈結 150 可被配置為最佳化沿著色散補償光纖鏈結 150 傳播的光子脈衝的時間性脈衝寬度。再次參照圖 5 A - 5 C，沿著色散補償光纖鏈結 150 傳播的光子的時間性脈衝寬度可由色散補償光纖鏈結 150 的特定配置所控制，使得由個

別量子中繼器230所接收的兩個光子包括相同或類似的時間性脈衝寬度。這最大化了由量子記憶體232所輸出的橫越分束器238的光子之間的時間性重疊，藉此改良了個別量子中繼器230的纏結成功率。例如，在不重疊相鄰的光子脈衝的情況下（例如在不在相同的色散補償光纖鏈結150內重疊第二脈衝的情況下）加寬各個光子脈衝的時間性脈衝寬度可增加量子中繼器230處的光子的纏結成功率。例如，重疊積分 Φ 可用來在光子傳播透過分束器238時基於該等光子的時間性重疊來在數學上量化量子中繼器230處的纏結調換過程，其中 $\Phi = \frac{\int \varphi_{Phr1}(t) \varphi_{Phr2}(t) dt}{\int \varphi_{Phr1}(t) dt \int \varphi_{Phr2}(t) dt}$ 、 φ_{Phr1} 表示第一光子的脈衝時間性剖線，而 φ_{Phr2} 表示第二光子的脈衝時間性剖線。儘管不是要受理論所限，但若 Φ 為1，則纏結調換過程是純的，且光子將在纏結偵測器235中的一者處一起被偵測到，且若 $\Phi < 1$ ，則纏結調換過程將是不純的，且纏結調換過程的純度（例如纏結成功率）可在數學上由熵 $\int = (.5\Phi)\log_2(.5\Phi)$ 所描述。具有重疊的時間性脈衝寬度及類似的頻譜寬度（亦即類似的時間性及頻譜脈衝形狀）的兩個光子同時到達可使得重疊積分 Φ 約為1。使用本文中所述的色散補償光纖鏈結150來光學耦接量子鍵產生系統201的元件可改良量子中繼器230的重疊積分 Φ ，使得重疊積分 Φ 接近1。

【0053】 再次參照圖5A-5C，量子鍵產生系統201可包括定位在第一端216及第二端218之間的額外的量子中繼器230及/或額外的經纏結光子產生器222。在圖5A

及 5 B 中所描繪的實施例中，額外的量子中繼器 230 及額外的經纏結光子產生器 222 可被交替地安置。各個額外的量子中繼器 230 可被安置在相鄰的經纏結光子產生器 222 之間及使用色散補償光纖鏈結 150 來光學耦接到相鄰的經纏結光子產生器 222。各個額外的經纏結光子產生器可被安置在額外的量子中繼器 230 以及另一額外量子中繼器 230 或個別終端量子記憶體 264 a、264 b、266 a、266 b 中的一者之間及使用色散補償光纖鏈結 150 來光學耦接到該額外的量子中繼器以及該另一額外量子中繼器或該個別終端量子記憶體中的一者。進一步地，在圖 5 C 所描繪的實施例中，多個量子中繼器 230 可一起光學耦接在第一端 216 及第二端 218 之間。使用色散補償光纖鏈結 150 來光學耦接的任何數量的額外量子中繼器 230 及額外的經纏結光子產生器 222 預期會增加光子纏結鏈 210 a、210 b 的長度同時最小化沿著光子纏結鏈 210 a、210 b 的訊號衰減。

【0054】此外，光學耦接到任何一個個別的量子中繼器 230 或經纏結光子產生器 222 的該對色散補償光纖鏈結 150 可包括實質同等的核心長度，使得個別的量子中繼器 230 可同時接收由相鄰的量子中繼器 230 或經纏結光子產生器 222 所輸出的個別光子。在某些實施例中，光學耦接到相對於各個光子纏結鏈 210 a、210 b 的起源位置 214 定位得越來越外面的各個個別的量子中繼器 230 或經纏結光子產生器 222 的該對色散補償光纖鏈結 150 可包括

越來越加長的核心長度，例如長度 L 及 L' ，其中 $L' > L$ ，如圖5 A及5 B中所描繪。

【0055】 因此，操作時，在經纏結的光子對由各個光子量子位元產生器220（例如圖5 A及5 B的經纏結光子產生器222或圖5 C的量子中繼器230）同時輸出時，相對於各個光子纏結鏈210 a、210 b的起源位置214定位得越來越外面的各個量子中繼器230在定位得較靠近各個光子纏結鏈210 a、210 b的起源位置214的量子中繼器230接收及纏結光子之後接收由相鄰的光子量子位元產生器220所輸出的光子。據此，在遠離各個光子纏結鏈210 a、210 b的起源位置214的方向上前行的光子變得纏結同時橫越色散補償光纖鏈結150。這產生了纏結調換的級聯鏈，使得由終端量子記憶體264 a、264 b、266 a、266 b在個別的光子纏結鏈210 a、210 b的第一端216處所接收的光子在到達之後與由終端量子記憶體264 a、264 b、266 a、266 b在相同的光子纏結鏈210 a、210 b的第二端218處所接收的光子纏結。

【0056】 仍參照圖5 A - 5 C，第一終端量子記憶體264 a、264 b及第二終端量子記憶體266 a、266 b可分別定位在光子纏結鏈210 a、210 b的第一端216及第二端218處。兩個光子纏結鏈210 a、210 b中的各者的第一終端量子記憶體264 a、264 b及第二終端量子記憶體266 a、266 b形成了第一交叉鏈量子中繼器260及第二交叉鏈量子中繼器262，該等交叉鏈量子中繼器包括光學耦

接到第一光子偵測單元 240 a 及第二光子偵測單元 240 b 的終端纏結光學件 270。第一交叉鏈量子中繼器 260 及第二交叉鏈量子中繼器 262 可在結構上被配置為產生可量測的經纏結粒子，而第一光子偵測單元 240 a 及第二光子偵測單元 240 b 可在結構上被配置為接收可量測的經纏結粒子。

【0057】 在某些實施例中，終端纏結光學件 270 可包括與量子中繼器 230 的纏結光學件 234 相同的元件，且可定位在光子纏結鏈 210 a、210 b 的第一端 216 及第二端 218 處。終端纏結光學件 270 包括一或更多個纏結路徑 272，該一或更多個纏結路徑光學耦接到終端量子記憶體 264 a、264 b、266 a、266 b 及光子偵測單元 240 a、240 b 且延伸於該等終端量子記憶體及光子偵測單元之間。在某些實施例中，該一或更多個纏結路徑 272 可包括波導器，例如上述的色散補償光纖鏈結 150、150'、150''。終端纏結光學件 270 更包括分束器 274，該分束器被定位為使得各個纏結路徑 272 橫越分束器 274。進一步地，終端纏結光學件 270 在結構上被配置為在由終端量子記憶體 264 a、264 b、266 a、266 b 所輸出的粒子同時橫越分束器 274 時纏結粒子對。

【0058】 操作時，交叉鏈量子中繼器 260、262 纏結來自各個光子纏結鏈 210 a、210 b 的光子。操作時，第一交叉鏈量子中繼器 260 及第二交叉鏈量子中繼器 262 在結構上被配置為接收由各個光子纏結鏈 210 a、210 b 的經纏

結光子產生器222及/或量子中繼器230所輸出的光子、纏結所接收到的光子及產生可由光子偵測單元240a、240b量測的可量測經纏結粒子。據此，在光子到達第一終端量子記憶體264a、264b及第二終端量子記憶體266a、266b時，到達各別光子纏結鏈210a、210b的第一終端量子記憶體264a、264b的光子可與到達相同的光子纏結鏈210a、210b的第二終端量子記憶體266a、266b的光子纏結。進一步地，交叉鏈量子中繼器260、262被配置為使用上文針對上述的量子記憶體232所描述的相同纏結操作來纏結所接收到的光子及產生可量測的經纏結粒子。

【0059】 仍參照圖5A-5C，第一光子偵測單元240a及第二光子偵測單元240b在結構上被配置為分別接收由第一交叉鏈量子中繼器260及第二交叉鏈量子中繼器262所產生的可量測的經纏結粒子。在某些實施例中，各個光子偵測單元240a、240b包括一對光子偵測器，該對光子偵測器定位得與終端量子記憶體264a、264b、266a、266b及/或終端纏結光學件270光學對準，使得由個別的終端量子記憶體264a、264b、266a、266b所產生的粒子由個別的光子偵測器所接收。此外，光子偵測單元240a、240b可包括一或更多個低雜訊光電二極體及/或一或更多個單光子偵測器，舉例而言，例如一或更多個超導奈米線單光子偵測器。在某些實施例中，光子偵測單元240a、240b可包括與纏結偵測器235a、235b相同的偵

測器；然而，安置在量子鍵產生系統201中的偵測器的任何組合是被考慮的。

【0060】 操作時，由第一交叉鏈量子中繼器260及第二交叉鏈量子中繼器262所產生的可量測的經纏結粒子被終端纏結光學件270纏結，使得各個光子偵測單元240a、240b量測可量測的經纏結粒子的關聯的（correlative）經纏結粒子性質。由各個光子偵測單元240a、240b所接收的可量測的經纏結粒子共享量子態，使得第一端216處的關聯的經纏結粒子性質的量測結果與第二端218處的關聯的經纏結粒子性質的量測結果關聯。關聯的纏結粒子性質可包括可量測的經纏結粒子的任何可量測的量子性質，例如線性偏振、圓偏振、螺旋、平移動量、軌域角動量等等。

【0061】 由各個光子偵測單元240a、240b所量測到的關聯的經纏結粒子性質可被轉換成關聯的量子鍵位元。各個關聯的量子鍵位元可包括二進位位元，例如「1」位元或「0」位元。在某些實施例中，由各個光子偵測單元240a、240b所量測到的關聯的經纏結粒子性質可包括對等的經纏結粒子性質，使得在各個光子偵測單元處所產生的各個關聯的量子鍵位元包括匹配的二進位位元。例如，在光子偵測單元240a量測到包括「0」位元的對等纏結性質時，光子偵測單元240b亦可量測到包括「0」位元的對等纏結性質。在其他實施例中，由各個光子偵測單元240a、140b所量測到的關聯的經纏結粒子性質包括正交

的經纏結粒子性質，使得在各個光子偵測單元處所產生的各個關聯的量子鍵位元包括相反的二進位位元。例如，在光子偵測單元 240 a 量測到包括「0」位元的正交纏結性質時，光子偵測單元 240 b 亦量測到包括「1」位元的正交纏結性質。

【0062】 在某些實施例中，關聯的經纏結粒子性質例如在將或不將關聯的經纏結粒子性質轉換成關聯的量子鍵位元的情況下可包括任何的量子資訊。例如，光子纏結鍵 210 a、210 b 在結構上被配置為例如藉由產生包括經纏結的量子態的粒子及向單獨的位置及在單獨的位置之間傳送經纏結的量子態來在單獨的位置之間傳遞任何量子資訊。在某些實施例中，光子纏結鍵 210 a、210 b 可在結構上被配置為用來傳遞量子資訊的一次性鍵墊（one-time key pad）。在一非限制性的實例中，量子通訊可包括可量測的經纏結粒子的任何可量測的量子性質，例如線性偏振、圓偏振、螺旋、平移動量、軌域角動量等等。

【0063】 進一步地，操作時，複數個迭代轉換的關聯量子鍵位元可在各個光子偵測單元 240 a、240 b 處形成量子鍵。例如，各個光子偵測單元 240 a、240 b 可將所接收到的關聯量子鍵位元迭代地轉換成一組關聯的二進位位元，使得各個光子偵測單元 240 a 及 240 b 可接收與由另一光子偵測單元 240 a、240 b 所接收到的量子鍵關聯的量子鍵。這允許將量子鍵用作密碼金鑰，使得第一端 216 及第二端 218 在古典通訊通道（例如圖 1 的通訊網路 190 的訊

號通道 195) 上之間的通訊可使用量子鍵來加密。此外，某些實施例可包括電子儲存設備，該等電子儲存設備通訊耦接到光子偵測單元 240 a、240 b 且在結構上被配置為電儲存關聯的量子鍵位元。在其他實施例中，光子偵測單元 240 a、240 b 可在結構上被配置為電儲存量子鍵。

【0064】 現參照圖 6，量子鍵產生系統 301 被配置為在沒有光子纏結的情況下傳播量子鍵位元資訊，且包括使用上述的色散補償光纖鏈結 150 中的一或更多者來光學耦接到光子偵測單元 340 的光子量子位元產生器 320。併入色散補償光纖鏈結 150 可增加量子鍵產生系統 301 的量子鍵位元率，因為色散補償光纖鏈結 150 誘發傳播透過色散補償光纖鏈結 150 的光子的低的絕對色散率及低的衰減率。具體而言，色散補償光纖鏈結 150（例如圖 3 A 及 3 B 的色散補償光纖鏈結 150' 及圖 4 A 及 4 B 的色散補償光纖鏈結 150''）被配置為使得可使用至少 10 吉位元/秒（Gbit/sec）的位元率（例如 20 吉位元/秒、30 吉位元/秒、40 吉位元/秒、50 吉位元/秒、75 吉位元/秒、100 吉位元/秒、150 吉位元/秒、200 吉位元/秒、250 吉位元/秒、500 吉位元/秒等等）在光子偵測單元 340 處接收由光子量子位元產生器 320 所輸出的該複數個光子的量子鍵位元資訊。

【0065】 光子量子位元產生器 320 可包括光學耦接到調變器的雷射。光子量子位元產生器 320 的雷射可被配置為以較量子鍵產生系統 201 的經纏結光子產生器 222 及

量子中繼器 230 為快的位元率輸出大量光子。光子偵測單元 340 可包括一或更多個單光子偵測器及 / 或一或更多個單光子偵測器，舉例而言，例如一或更多個超導奈米線單光子偵測器、碳奈米線偵測器等等。操作時，量子鍵產生系統 301 可執行任何已知的或有待開發的基於非纏結的量子通訊協定，例如 BB84 協定、E91 協定等等。

【0066】 仍參照圖 6，量子鍵產生系統 301 可更包括光學耦接到光子位元產生器 320 的衰減器 380，該衰減器例如定位在光子量子鍵位元產生器 320 及光子偵測單元 340 之間且光學耦接到該光子量子鍵位元產生器及該光子偵測單元。衰減器 380 在結構上被配置為衰減由光子量子位元產生器 320 所輸出的該複數個光子的子集。量子鍵產生系統 301 亦可包括偏振器 382、偏振控制器 384、偏振維持連接器 386、相位調變器 388 或其組合，各個元件定位在衰減器 380 及光子偵測單元 340 之間且光學耦接到該衰減器及該光子偵測單元。這些元件中的各者可光學耦接到相鄰地定位的光學元件且藉此使用上述的色散補償光纖鏈結 150 來光學耦接到光子鍵位元產生器 320 及光子偵測單元 340。

【0067】 本文中所揭露的技術的主要應用是至少部分地由於量子通訊的本質及機制而傳遞量子鍵位元資訊。然而，如可藉由以上的揭示內容所充分瞭解的，可經由本文中所揭露的技術來適當地傳遞其他及 / 或額外的資訊，本

文中針對量子鍵位元資訊的傳遞的主張及揭示內容可被概括成資訊及量子資訊的傳遞。

【0068】 為了描述及界定本發明性技術的目的，注意，本文中對於是參數或另一變數的「函數」的變數的指稱不是要指示該變數僅僅是所列舉的參數或變數的函數。反而，本文中對於是所列舉的參數的「函數」的變數的指稱要是可擴充的，使得該變數可為單個參數或複數個參數的函數。

【0069】 亦注意，本文中「至少一個」元件、構件等等的記載不應被用來創建以下推論：冠詞「一（a）」或「一（an）」的替代使用應限於單個元件、構件等等。

【0070】 注意，本文中本揭示案的元件以特定方式「配置」以使用特定方式實現特定的性質或功能的記載是結構性的記載，與預期用途的記載相反。更具體而言，本文中對於「配置」元件的方式的指稱指示該元件的現存實體條件，且因此要被視為該元件的結構特性的確切記載。

【0071】 為了描述及界定本發明性技術的目的，注意，用語「實質上」及「大約」在本文中被用來表示可歸因於任何定量比較、值、量測結果或其他表示的固有的不決定程度。用語「實質上」及「大約」在本文中亦用來表示以下程度：定量表示可相對於所述的指稱有所不同，而不造成待裁決的標的的基本功能上的改變。

【0072】 在已詳細地且參照標的的特定實施例來描述本揭示案的標的的情況下，注意，本文中所揭露的各種細

節不應被視為暗示這些細節是關於本文中所述的各種實施例的必要元件的構件，即使是在隨附於本說明書的繪圖中的各者中繪示了特定的構件的情況下。進一步地，將理解到，更改及變化在不脫離本揭示案的範圍（包括但不限於隨附請求項中所界定的實施例）的情況下是可能的。更具體而言，儘管本揭示案的某些態樣在本文中也被識別為較佳的或特別有利的，考慮的是，本揭示案不一定限於這些態樣。

【0073】 注意，以下請求項中的一或更多者將用語「其中」用作過渡短語。為了界定本發明性技術的目的，注意，此用語被引入於請求項中作為用來引入結構的一系列特性的記載的可擴充的過渡短語，且應以與更常用的可擴充前言用語「包括」類似的方式來解讀。

【符號說明】

【0074】

- 100 量子通訊系統
- 101 量子鍵產生系統
- 102 光子脈衝
- 103 脈衝中心
- 104 光子脈衝
- 105 脈衝中心
- 120 光子量子位元產生器
- 140 光子偵測單元
- 150 色散補償光纖鏈結

1 5 0 ' 色散補償光纖鏈結
 1 5 0 '' 色散補償光纖鏈結
 1 5 2 核 心
 1 5 4 包 覆 層
 1 5 4 a 包 覆 部 分
 1 5 4 b 包 覆 部 分
 1 5 5 包 覆 環
 1 5 6 外 包 覆 面
 1 9 0 通 訊 網 路
 1 9 2 訊 號 產 生 器
 1 9 4 訊 號 接 收 器
 1 9 5 訊 號 通 道
 2 0 1 量 子 鍵 產 生 系 統
 2 1 0 a 光 子 纏 結 鏈
 2 1 0 b 光 子 纏 結 鏈
 2 1 4 起 源 位 置
 2 1 6 第 一 端
 2 1 8 第 二 端
 2 2 0 光 子 量 子 位 元 產 生 器
 2 2 2 經 纏 結 光 子 產 生 器
 2 3 0 量 子 中 繼 器
 2 3 2 量 子 記 憶 體
 2 3 4 纏 結 光 學 件
 2 3 5 纏 結 偵 測 器

2 3 6 纏 結 路 徑

2 3 8 分 束 器

2 4 0 a 光 子 偵 測 單 元

2 4 0 b 光 子 偵 測 單 元

2 6 0 交 叉 鏈 量 子 中 繼 器

2 6 2 交 叉 鏈 量 子 中 繼 器

2 6 4 a 終 端 量 子 記 憶 體

2 6 4 b 終 端 量 子 記 憶 體

2 6 6 a 終 端 量 子 記 憶 體

2 6 6 b 終 端 量 子 記 憶 體

2 7 0 終 端 纏 結 光 學 件

2 7 2 纏 結 路 徑

2 7 4 分 束 器

3 0 1 量 子 鏈 產 生 系 統

3 2 0 光 子 量 子 位 元 產 生 器

3 4 0 光 子 偵 測 單 元

3 8 0 衰 減 器

3 8 2 偏 振 器

3 8 4 偏 振 控 制 器

3 8 6 偏 振 維 持 連 接 器

3 8 8 相 位 調 變 器

D_P 脈 衝 間 隔 距 離

L 長 度

L' 長 度

W_{P1} 時間性脈衝寬度

W_{P2} 時間性脈衝寬度

【生物材料寄存】

【 0 0 7 5 】 國內寄存資訊 (請依寄存機構、日期、號碼順序註記)

無

【 0 0 7 6 】 國外寄存資訊 (請依寄存國家、機構、日期、號碼順序註

記)

無

【發明申請專利範圍】

【第1項】 一種量子通訊系統，包括：

一量子鍵產生系統，包括一光子量子位元產生器、
一色散補償光纖鏈結及一光子偵測單元；及

一通訊網路，包括一訊號產生器、一訊號通道及一
訊號接收器；其中：

該色散補償光纖鏈結延伸於該光子量子位元產生
器及該光子偵測單元之間且光學耦接該光子量子位
元產生器及該光子偵測單元；

該光子量子位元產生器在結構上被配置為輸出複
數個光子，該複數個光子中的各個光子包括量子鍵
位元資訊；

該光子偵測單元在結構上被配置為接收該複數個
光子的該量子鍵位元資訊；

該訊號通道延伸於該訊號產生器及該訊號接收器
之間且通訊耦接該訊號產生器及該訊號接收器；

該訊號產生器在結構上被配置為輸出包括一或更
多個訊號位元的一訊號；

該訊號接收器通訊耦接到該光子偵測單元且在結
構上被配置為在接收該訊號之後將該一或更多個訊
號位元與該量子鍵位元資訊進行比較；及

該色散補償光纖鏈結包括一核心及圍繞該核心的一包覆層，且在結構上被配置為以一絕對色散率誘發包括約 1550 nm 的一波長的一光子的色散及以一衰減率誘發包括約 1550 nm 的該波長的該光子的衰減，使得可使用至少約 100 億位元/秒的一位元率在該光子偵測單元處接收由該光子量子位元產生器所輸出的該複數個光子的該量子鍵位元資訊，其中該絕對色散率為約 $9\text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少，且其中該衰減率為約 0.18 dB/Km 或更少。

【第2項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該色散補償光纖鏈結包括一拋物線折射率剖線。

【第3項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該核心包括從約 $2.2\text{ }\mu\text{m}$ 到約 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的一半徑。

【第4項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該色散補償光纖鏈結的該核心包括從約 -0.1 到約 0.2 的一相對折射率 Δ_1 ，其中：

Δ_1 包括 $(n_1 - n_s)/n_s$ ；

n_1 包括該核心的一折射率；及

n_s 包括純矽石的一折射率。

【第5項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該色散補償光纖鏈結的該包覆層包括從約 -0.4 到約 -0.7 的一相對折射率 Δ_2 ，其中：

Δ_2 包括 $(n_2 - n_s)/n_s$ ；

n_2 包括該包覆層的一折射率；及

n_s 包括純矽石的一折射率。

【第6項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該色散補償光纖鏈結包括約1200 nm或更少的一截止波長。

【第7項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該色散補償光纖鏈結包括從約7.5 μm 到約9.0 μm 的一模場直徑。

【第8項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該色散補償光纖鏈結包括從約40 μm^2 到約55 μm^2 的一有效面積。

【第9項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該色散補償光纖鏈結包括從約0.051 $\text{ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 到約0.054 $\text{ps}/(\text{nm}^2)\text{km}$ 的一色散斜率。

【第10項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該包覆層包括一第一包覆部分、一第二包覆部分及安置在該第一包覆部分及該第二包覆部分之間的一包覆環。

【第11項】如請求項1所述的量子通訊系統，其中該色散補償光纖鏈結在結構上被配置為使得可使用至少約500億位元/秒的一位元率在該光子偵測單元處接收由該光子量子位元產生器所輸出的該複數個光子的該量子鍵位元資訊。

【第12項】 一種量子鍵產生系統，包括：

一色散補償光纖鏈結，延伸於一光子量子位元產生器及一光子偵測單元之間且光學耦接該光子量子位元產生器及該光子偵測單元，其中：

該色散補償光纖鏈結包括一核心及圍繞該核心的一包覆層，且在結構上被配置為以一絕對色散率誘發包括約 1550 nm 的一波長的一光子的色散及以一衰減率誘發包括約 1550 nm 的該波長的該光子的衰減，使得可使用至少約 100 億位元/秒的一位元率在該光子偵測單元處接收由該光子量子位元產生器所輸出的複數個光子的量子鍵位元資訊，其中該絕對色散率為約 $9\text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少，且其中該衰減率為約 0.18 dB/Km 或更少。

【第13項】 一種量子鍵產生系統，包括：

兩個光子纏結鏈；

複數個色散補償光纖鏈結；及

兩個光子偵測單元；其中：

各個光子纏結鏈延伸於該兩個光子偵測單元之間；

各個光子纏結鏈包括使用該複數個色散補償光纖鏈結來光學耦接的至少一個光子量子位元產生器及第一終端量子記憶體及第二終端量子記憶體；

該第一終端量子記憶體及該第二終端量子記憶體分別定位在該等光子纏結鏈的第一端及第二端處；

該兩個光子纏結鏈中的各者的該第一終端量子記憶體及該第二終端量子記憶體分別形成第一交叉鏈量子中繼器及第二交叉鏈量子中繼器，以在該等交叉鏈量子中繼器處產生可量測的經纏結粒子；及

該第一光子偵測單元及該第二光子偵測單元在結構上被配置為分別接收由該第一交叉鏈量子中繼器及該第二交叉鏈量子中繼器所產生的該等可量測的經纏結粒子；

該複數個色散補償光纖鏈結包括一核心及圍繞該核心的一包覆層；

該包覆層包括一第一包覆部分、一第二包覆部分及一包覆環，該包覆環介於該第一包覆部分與該第二包覆部分之間；及

該核心包括一相對折射率 Δ_1 ，該第一包覆部分包括一相對折射率 Δ_2 ，且該包覆環包括一相對折射率 Δ_3 ，其中 $\Delta_1 > \Delta_3 > \Delta_2$ 。

【第14項】 一種量子鏈產生系統，包括：

兩個光子纏結鏈；

複數個色散補償光纖鏈結；及

兩個光子偵測單元；其中：

各個光子纏結鏈延伸於該兩個光子偵測單元之間；

各個光子纏結鏈包括使用該複數個色散補償光纖鏈結來光學耦接的至少一個光子量子位元產生器及第一終端量子記憶體及第二終端量子記憶體；

該第一終端量子記憶體及該第二終端量子記憶體分別定位在該等光子纏結鏈的第一端及第二端處；

該兩個光子纏結鏈中的各者的該第一終端量子記憶體及該第二終端量子記憶體分別形成第一交叉鏈量子中繼器及第二交叉鏈量子中繼器，以在該等交叉鏈量子中繼器處產生可量測的經纏結粒子；及

該第一光子偵測單元及該第二光子偵測單元在結構上被配置為分別接收由該第一交叉鏈量子中繼器及該第二交叉鏈量子中繼器所產生的該等可量測的經纏結粒子，其中：

該複數個色散補償光纖鏈結包括一核心及圍繞該核心的一包覆層；及

該複數個色散補償光纖鏈結在結構上被配置為以一絕對色散率誘發包括約 1550 nm 的一波長的一光子的色散及以一衰減率誘發包括約 1550 nm 的該波長的該光子的衰減，使得可使用至少約 100 億位元/秒的一位元率在該第一光子偵測單元或該第二光子偵測單元處

接收由各個光子量子位元產生器所輸出的複數個光子的量子鍵位元資訊，其中該絕對色散率為約 $9\text{ ps}/(\text{nm})\text{km}$ 或更少，且其中該衰減率為約 0.18 dB/Km 或更少。

【第15項】 一種量子鍵產生系統，包括：

兩個光子纏結鏈；

複數個色散補償光纖鏈結；及

兩個光子偵測單元；其中：

各個光子纏結鏈延伸於該兩個光子偵測單元之間；

各個光子纏結鏈包括使用該複數個色散補償光纖鏈結來光學耦接的至少一個光子量子位元產生器及第一終端量子記憶體及第二終端量子記憶體；

該第一終端量子記憶體及該第二終端量子記憶體分別定位在該等光子纏結鏈的第一端及第二端處；

該兩個光子纏結鏈中的各者的該第一終端量子記憶體及該第二終端量子記憶體分別形成第一交叉鏈量子中繼器及第二交叉鏈量子中繼器，以在該等交叉鏈量子中繼器處產生可量測的經纏結粒子；及

該第一光子偵測單元及該第二光子偵測單元在結構上被配置為分別接收由該第一交叉鏈量子中繼器及該第二交叉鏈量子中繼器所產生的該等可量測的經纏結粒子，其中該複數個色散補償光纖鏈結在結構上被配置

為使得可使用至少約1000億位元/秒的一位元率在該第一光子偵測單元或該第二光子偵測單元處接收由各個光子量子位元產生器所輸出的複數個光子的量子鍵位元資訊。

【發明圖式】

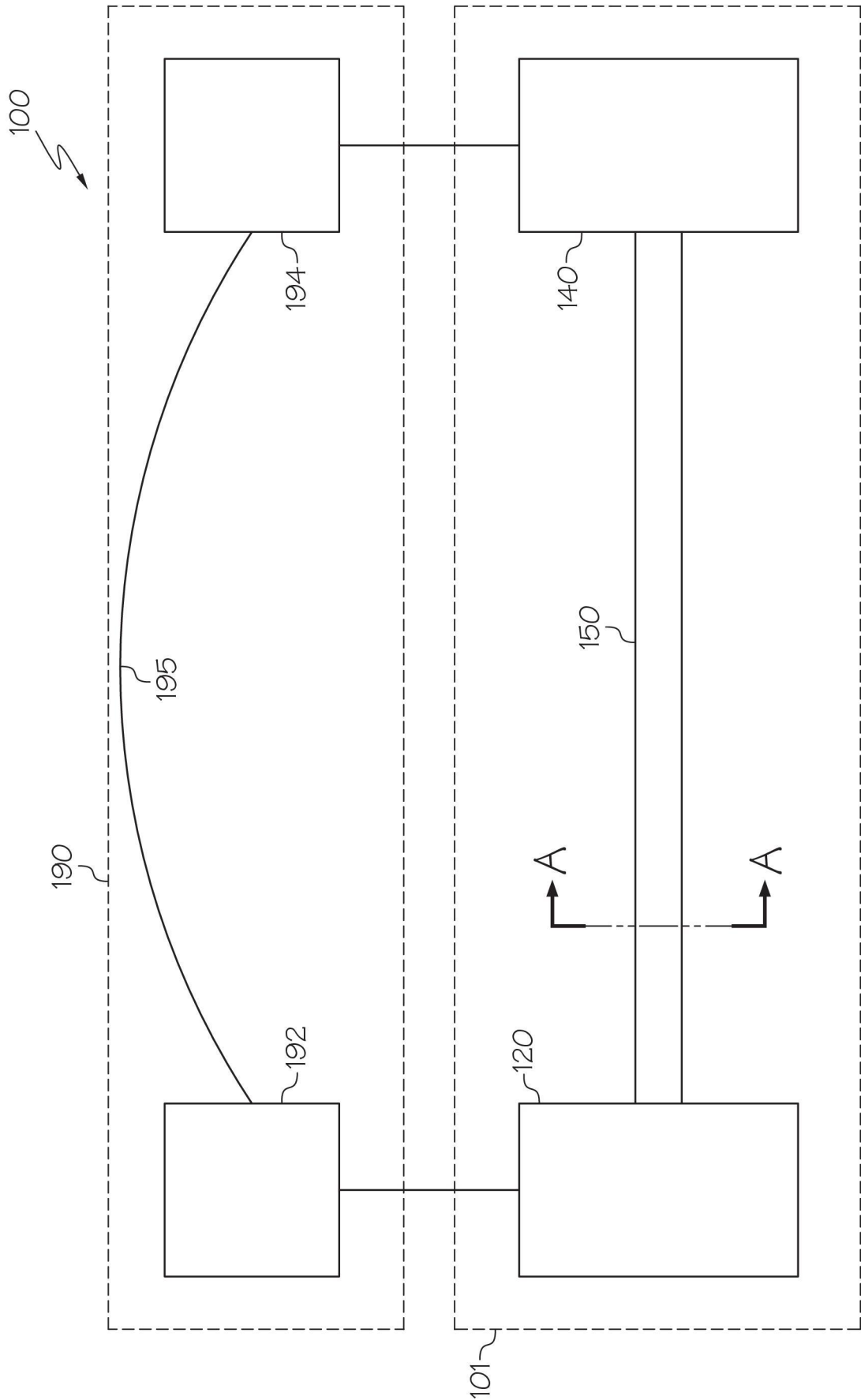


圖1

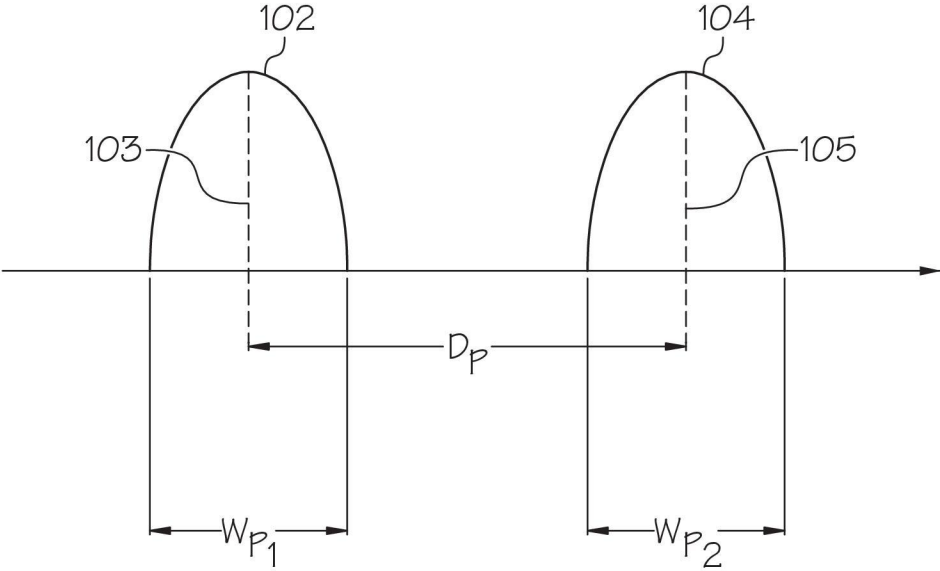


圖2

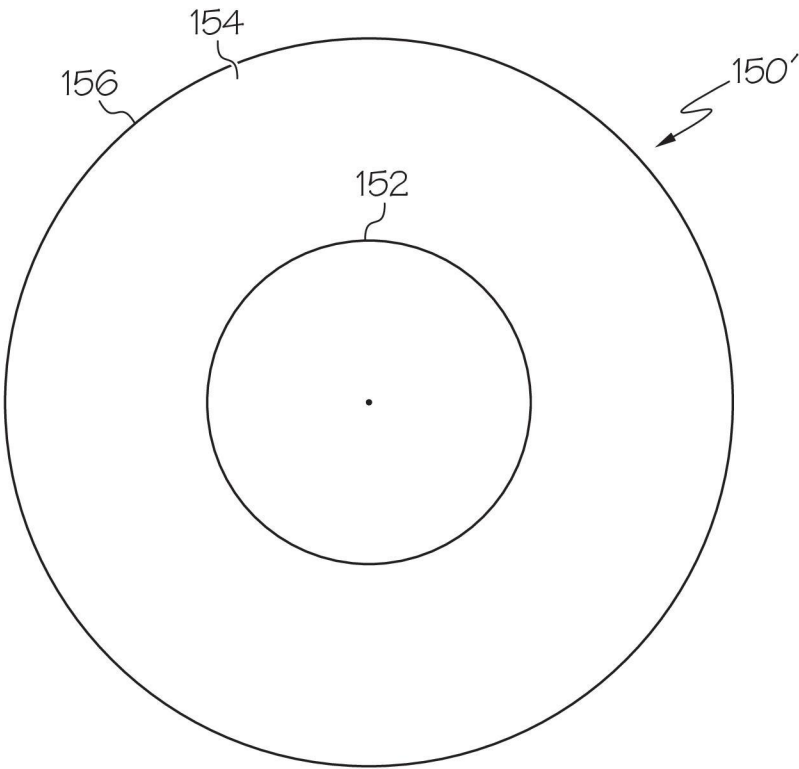


圖3A

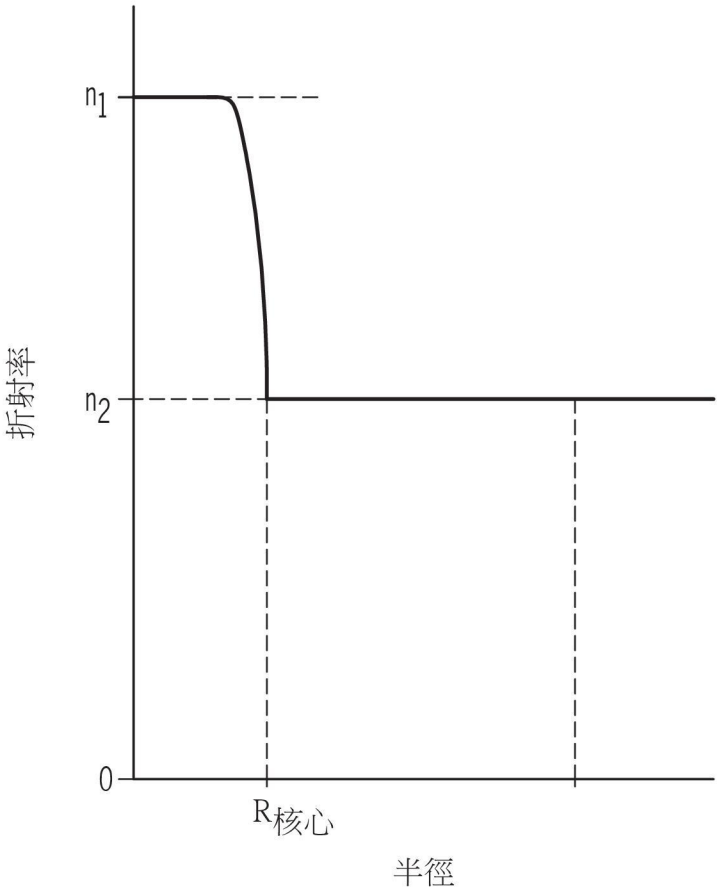


圖3B

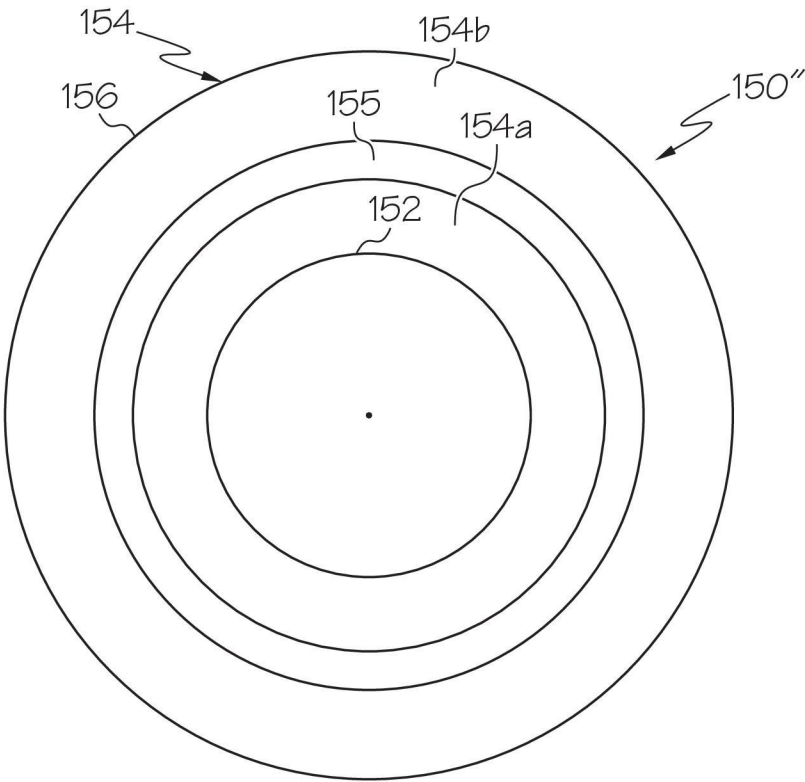


圖4A

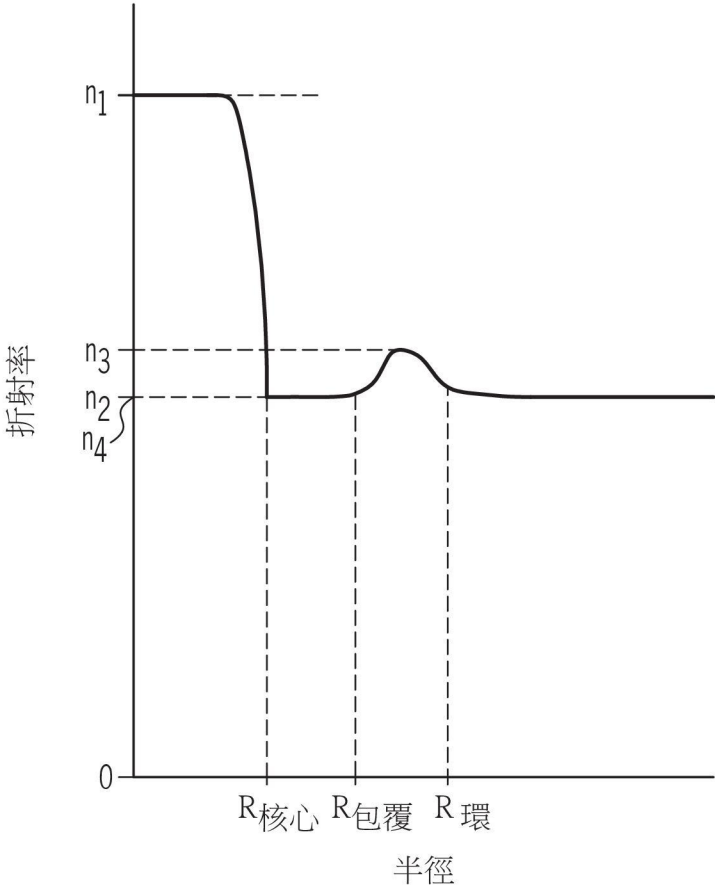


圖4B

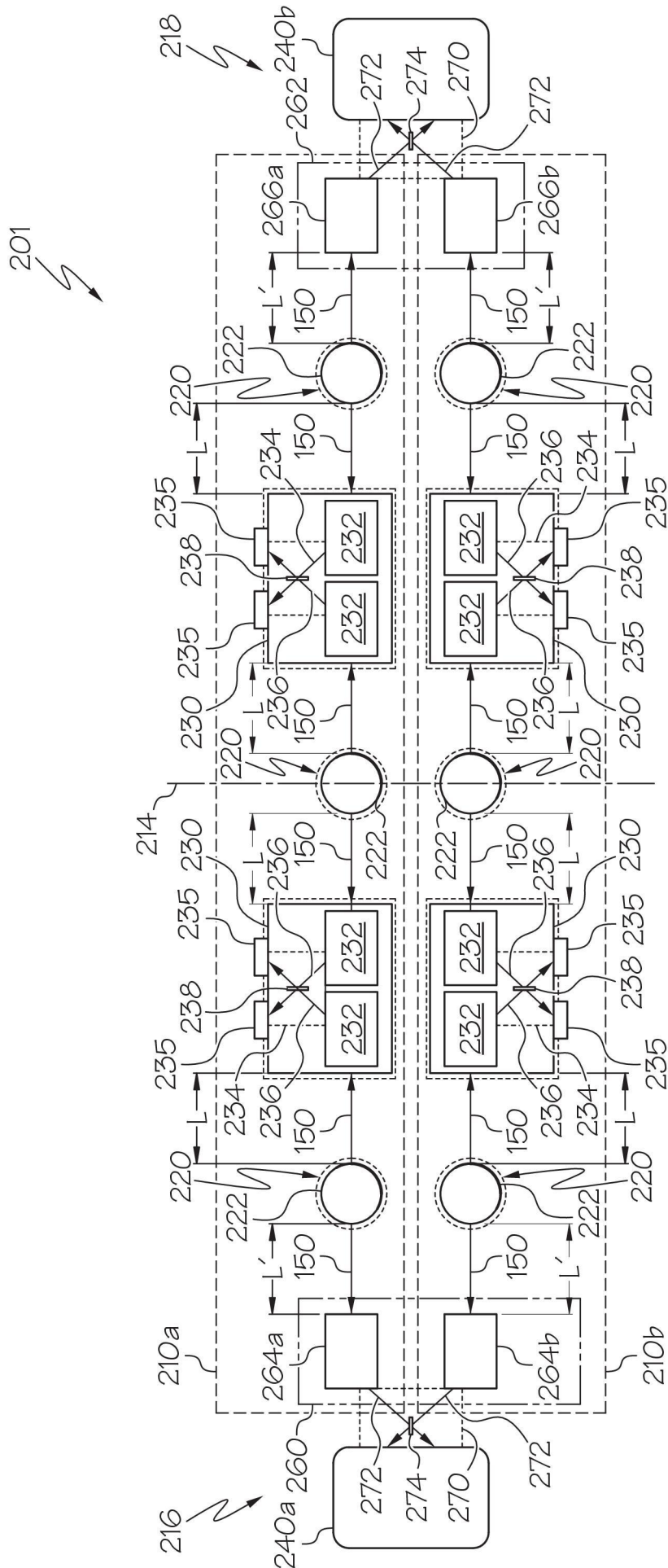


圖5A

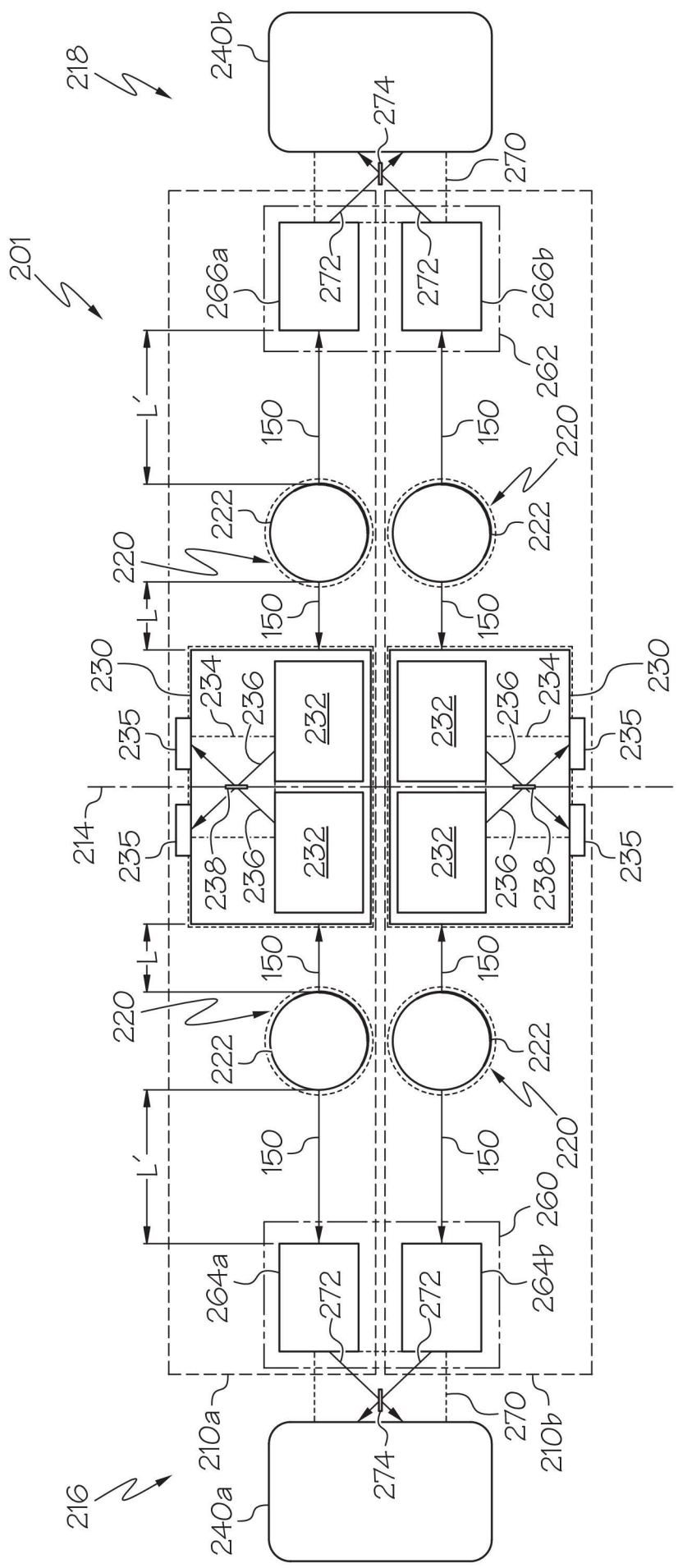
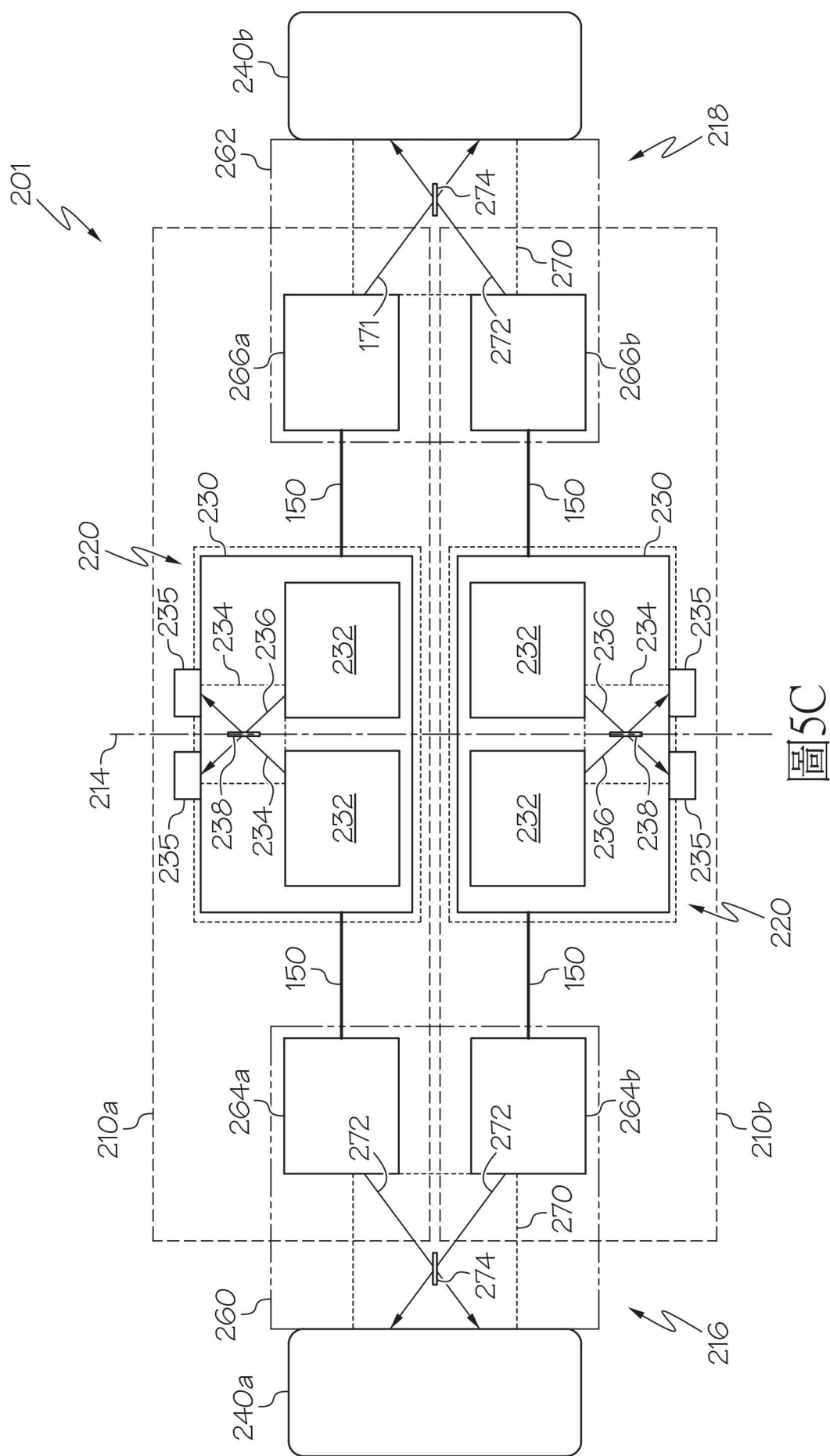


圖5B



第 7 頁，共 8 頁(發明圖式)

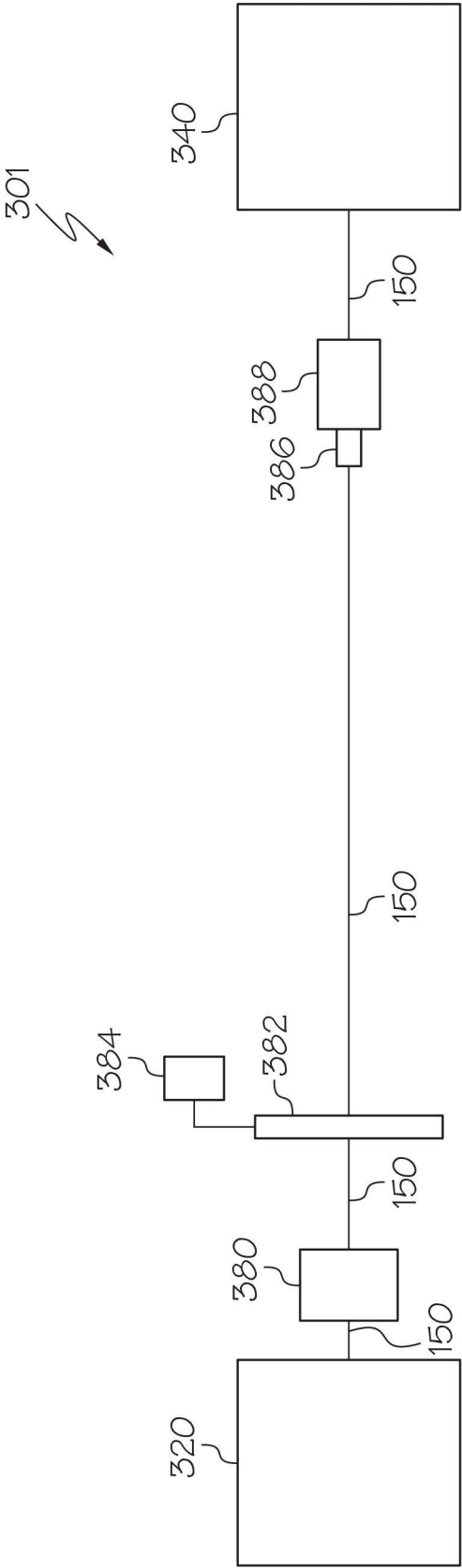


圖6