



(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 I596911 B

(45)公告日：中華民國 106 (2017) 年 08 月 21 日

(21)申請案號：102117957

(22)申請日：中華民國 102 (2013) 年 05 月 21 日

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

(30)優先權：2012/05/25 美國 61/651,599

(71)申請人：康寧公司(美國) CORNING INCORPORATED (US)
美國(72)發明人：海門威布瑞斯特羅伊二世 HEMENWAY, BREWSTER ROE, JR. (US)；羅達斯伊安
尼斯 ROUDAS, IOANNIS (GR)

(74)代理人：蔡坤財；李世章

(56)參考文獻：

EP 0403991A2

US 6293081B1

US 6304369B1

US 2006/060759A1

US 2009/003755A1

US 2010/202785A1

US 2011/052129A1

US 2012/087616A1

ROGER HELKEY: "Relative-Intensity-Noise Cancellation in Bandpass External-Modulation Links", IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 46, no. 12, 1 December 1998 (1998-12-01), XP011037403, ISSN: 0018-9480

審查人員：賴恩賞

申請專利範圍項數：27 項 圖式數：12 共 51 頁

(54)名稱

用於差動光信號之系統

SYSTEMS FOR DIFFERENTIAL OPTICAL SIGNALING

(57)摘要

根據一個實施例，用於傳輸差動光信號之系統可包括光調變裝置、多芯光波導，及平衡光接收器。光調變裝置可包括至少一個光輸入埠及多個光輸出埠。光調變裝置可將光輸入信號轉換為自多個光輸出埠傳輸的多個互補調變光信號。多芯光波導可包括安置於包覆材料中的多個芯。多個芯、包覆材料，或多個芯及包覆材料兩者可經配置以緩和多個芯之間的光能量之傳輸。平衡光接收器可包括多個光偵測器。平衡光接收器可以通信方式耦接至多芯光波導之多個芯。多個光偵測器中之每一光偵測器可將多個互補調變光信號中之至少一個光信號轉換為電信號。

According to one embodiment, a system for transmitting differential optical signals can include an optical modulation device, a multi-core optical waveguide, and a balanced optical receiver. The optical modulation device can include at least one optical input port and multiple optical output ports. The optical modulation device can transform the optical input signal into multiple complimentary modulated optical signals that are transmitted from the multiple optical output ports. The multi-core optical waveguide can include multiple cores disposed within a cladding material. The multiple cores, the cladding material, or both can be configured to mitigate transmission of optical energy between the multiple cores. The balanced optical receiver can include multiple photodetectors. The balanced optical receiver can be communicatively

指定代表圖：



- 40 . . . 多芯光波導
- 110 . . . 用於差動光信號之系統
- 112 . . . 等幅波光源
- 114 . . . 電信號產生器
- 120 . . . 光調變裝置
- 122 . . . 光輸入埠
- 124 . . . 第一光路徑
- 126 . . . 第二光路徑
- 128 . . . 第一光輸出埠
- 130 . . . 第二光輸出埠
- 132 . . . 第一電極
- 134 . . . 第二電極
- 136 . . . 第三電極
- 160 . . . 平衡光接收器
- 162 . . . 光偵測器
- 164 . . . 電信號合併器
- 166 . . . 濾波裝置
- 168 . . . 限幅電路

發明摘要

※ 申請案號：102117957

※ 申請日：102 年 5 月 21 日

※IPC 分類：~~H04B~~ 10/25(2013.01)

【發明名稱】（中文/英文）

用於差動光信號之系統/SYSTEMS FOR DIFFERENTIAL
OPTICAL SIGNALING

【中文】

根據一個實施例，用於傳輸差動光信號之系統可包括光調變裝置、多芯光波導，及平衡光接收器。光調變裝置可包括至少一個光輸入埠及多個光輸出埠。光調變裝置可將光輸入信號轉換為自多個光輸出埠傳輸的多個互補調變光信號。多芯光波導可包括安置於包覆材料中的多個芯。多個芯、包覆材料，或多個芯及包覆材料兩者可經配置以緩和多個芯之間的光能量之傳輸。平衡光接收器可包括多個光偵測器。平衡光接收器可以通信方式耦接至多芯光波導之多個芯。多個光偵測器中之每一光偵測器可將多個互補調變光信號中之至少一個光信號轉換為電信號。

【英文】

According to one embodiment, a system for transmitting differential optical signals can include an optical modulation device, a multi-core optical waveguide, and a balanced optical receiver. The optical modulation

device can include at least one optical input port and multiple optical output ports. The optical modulation device can transform the optical input signal into multiple complimentary modulated optical signals that are transmitted from the multiple optical output ports. The multi-core optical waveguide can include multiple cores disposed within a cladding material. The multiple cores, the cladding material, or both can be configured to mitigate transmission of optical energy between the multiple cores. The balanced optical receiver can include multiple photodetectors. The balanced optical receiver can be communicatively coupled to the multiple cores of the multi-core optical waveguide. Each of the multiple photodetectors can transform at least one of the multiple complimentary modulated optical signals into an electrical signal.

【代表圖】

【本案指定代表圖】：第（ 2 ）圖。

【本代表圖之符號簡單說明】：

40 多芯光波導

110 用於差動光信號之系統

112 等幅波光源

114 電信號產生器

120 光調變裝置

- 122 光輸入埠
- 124 第一光路徑
- 126 第二光路徑
- 128 第一光輸出埠
- 130 第二光輸出埠
- 132 第一電極
- 134 第二電極
- 136 第三電極
- 160 平衡光接收器
- 162 光偵測器
- 164 電信號合併器
- 166 濾波裝置
- 168 限幅電路

【本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式】：

無

發明專利說明書

(本說明書格式、順序，請勿任意更動)

【發明名稱】(中文/英文)

用於差動光信號之系統/SYSTEMS FOR DIFFERENTIAL
OPTICAL SIGNALING

【相關申請案之交互參照】

【0001】本申請案主張於 2012 年 5 月 25 日申請的美國臨時申請案第 61/651599 號之優先權的權益，該美國臨時申請案之內容作為本申請案之依據，且該美國臨時申請案之內容以全文引用之方式併入本文中。

【技術領域】

【0002】本說明書大體上係關於用於差動光信號之系統，且更特定而言，本說明書係關於用於 M 階調變格式的差動光信號之系統。

【先前技術】

【0003】短距離高速光互連可用於各種高效能電腦及資料中心應用。在諸多光互連，諸如以開關鍵控操作之鐳射/外部調變器鏈路中，大約一半由鐳射產生之光功率未被使用。特定而言，外部調變器鏈路大體上在關閉狀態期間抑制鐳射功率。此外，當接收到開關鍵控調變時，最佳決策臨限值可相對於所接收的光功率而浮動，亦即，功率愈高，臨限值愈高。因此，最佳決策臨限值適應於光信號功率或一與零狀態中之雜訊方差。

【0004】光差動信號大體上包括在多個單獨的傳輸通道上兩個或兩個以上互補信號之傳輸。一旦收到，可將互補信號合併以提取編碼於信號中之資料。歸因於匹配的群延遲及再生之成本，可難以在光纖傳輸系統中實施光差動信號。單個光纖中的分波長多工可用於克服與使用兩個離散光纖時匹配光纖延遲相關聯之困難。然而，可難以用單個調變器產生此調變信號。此外，必須在分波長多工中匹配鏈路之色散。

【0005】因此，存在對用於差動光信號的替代性系統之需求。

● 【發明內容】

● 【0006】根據一個實施例，用於傳輸光信號之系統可包括光調變裝置、多芯光波導，及平衡光接收器。光調變裝置可包括至少一個光輸入埠及多個光輸出埠。可在至少一個光輸入埠處接收具有輸入功率之光輸入信號。光調變裝置可將光輸入信號轉換為自多個光輸出埠傳輸的多個互補調變光信號，每一互補調變光信號具有輸出功率。多個互補調變光信號之輸出功率的總和可實質上等於藉由光調變裝置的至少一個光輸入埠接收之光輸入信號的輸入功率。多芯光波導可光耦接至光調變裝置的多個光輸出埠。多芯光波導可包括安置於包覆材料中的多個芯。多個芯、包覆材料，或多個芯及包覆材料兩者可經配置以緩和多個芯之間的光能量之交換。平衡光接收器可包括多個光偵測器。平衡光接收器可以通信方式耦接至多芯光波導之多個芯。多個光偵測器中之每一光偵測器可將多個互補調變光信號中之至少一個光信號轉換為電信號。可將平衡光接收器的多個光偵測器之電信號合併以形成

脈波振幅調變信號。

【0007】在以下詳細描述中將提出本發明之額外的特徵及優勢，且在某種程度上，通過彼等描述，該等特徵及優勢對熟悉此項技術者將顯而易見，或者通過實踐本文所描述之實施例（包括以下具體實施方式、申請專利範圍以及附圖）而認識到該等特徵及優勢。

【0008】應瞭解，以上一般描述及以下詳細描述兩者描述各種實施例，且意欲提供概覽或框架以用於理解所主張標的之本質與特徵。包括附隨圖式以提供對各種實施例之進一步理解，且附隨圖式併入本說明書中並構成本說明書之一部分。圖式圖示本文描述之各種實施例，且與描述一起用以解釋所主張標的之原理及操作。

【圖式簡單說明】

【0009】第 1 圖示意性圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的用於差動光信號之系統；

【0010】第 2 圖示意性圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的用於差動光信號之系統；

【0011】第 3 圖示意性圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的多芯光波導；

【0012】第 4 圖示意性圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的多芯光波導；

【0013】第 5 圖以圖表圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的折射率反差對芯直徑；

【0014】第 6A 圖至第 6C 圖示意性圖示根據本文展示及描述

的一或更多個實施例的多芯光波導；

【0015】第 7 圖示意性圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的多芯光波導；

【0016】第 8 圖以圖表圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的在零狀態附近經對稱調變之 QPAM 信號；

【0017】第 9 圖示意性圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的用於差動光信號之系統；

【0018】第 10 圖示意性圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的用於差動光信號之系統；

【0019】第 11 圖示意性圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的用於差動光信號之系統；及

【0020】第 12 圖以圖表圖示根據本文展示及描述的一或更多個實施例的光能量/b 損失對振幅位準。

【實施方式】

【0021】現將詳細參考本揭示案之實施例，在附隨圖式中示意性圖示該等實施例之實例。在任何可能情況下，相同元件符號將在圖式中用於指代相同或相似部分。第 1 圖中圖示用於差動光信號之系統的一個實施例，且大體上在全文中藉由元件符號 10 指代該系統。

【0022】在本揭示案中將參考術語光(light)或光(optical)。如本文中所使用，術語「光(light)」及「光(optical)」指代具有與電磁波譜相關聯的各種波長之輻射，該等波長包括但不限於紫外線(UV)、紅外線(IR)及電磁波譜的可見部分中之波長。

【0023】現參考第 1 圖，用於差動光信號之系統 10 可包括光調變裝置 20，光調變裝置 20 用於將光輸入信號 100 轉換為多個互補調變光信號 102。光調變裝置 120 可經配置以便光調變裝置 120 之一或更多個輸出信號可同時具有一或更多個互補輸出信號。在一些實施例中，光調變裝置 120 可調變光輸入信號 100 之振幅以便互補調變光信號 102 的功率之總和實質上等於（忽略輸入/輸出耦合損耗、傳播損耗，等等）藉由光調變裝置 20 接收的光輸入信號 100 之功率。特定而言，藉由光調變裝置 20 經一時間週期接收的實質上所有入射光信號隨後經轉換為藉由光調變裝置 20 傳輸之一或更多個輸出光信號。每一時間週期可為自約實質上瞬時至多個輸入或輸出信號週期之任何時間週期。需注意，術語「信號」意指能夠穿越媒體之任意波形，諸如 DC、AC、正弦波、三角波、方波、振動，等等。

【0024】在一些實施例中，光調變裝置 20 可經配置以接收調變信號 104，調變信號 104 可用於控制光輸入信號 100 至多個互補調變光信號 102 之轉換。舉例而言，當光調變裝置 20 為電-光調變器時，調變信號可為電資料信號且可根據電資料信號調變光輸入信號。

【0025】現參考第 2 圖，在一個實施例中，用於差動光信號之系統 110 可包含由馬赫耳-曾德調變器（Mach-Zehnder modulator；MZM）形成之光調變裝置 120。光調變裝置 120 可包含用於接收光信號之光輸入埠 122。可將光輸入埠 122 分為第一光路徑 124 及第二光路徑 126，第一光路徑 124 將光

輸入埠 122 光耦接至第一光輸出埠 128，第二光路徑 126 將光輸入埠 122 光耦接至第二光輸出埠 130。光調變裝置 120 可進一步包括第一電極 132、第二電極 134，及第三電極 136；第一電極 132、第二電極 134，及第三電極 136 可用於控制穿越第一光路徑 124 及第二光路徑 126 的光信號之間的相位差。

【0026】另外或或者，本文中描述的光調變裝置可包括任何光調變器，舉例而言，諸如鋨酸鋰電-光或無矽載波微環諧振器（MRR）或馬赫耳-曾德干擾儀（Mach-Zehnder interferometer；MZI），或任何其他電-光振幅調變器，該光調變器輸出具有功率的光信號，以便傳輸入射到調變器上之實質上所有的光功率。特定實例包括具有雙輸出埠之習知光調變器，如此光信號若不存在於一個埠上，則自動存在於另一個埠上。一些實施例可利用具有兩個輸出埠之 MZI 或 MRR 調變器，以便反而將通常專用於局部偏壓調變器之第二埠用作光輸出。需注意，儘管上述實施例包括電-光振幅調變器，但本文中描述的實施例可利用調變光信號之參數以輸出互補光信號之任何類型的裝置，諸如振幅調變器、相位調變器、偏極化調變器、頻率調變器，等等。此外，合適光調變器包括但不限於電-光調變器、聲-光調變器、磁-光調變器、機械-光調變器、熱-光調變器，或上述諸調變器之組合。

【0027】再次參考第 1 圖，用於差動光信號之系統 10 可包括光耦接至光調變裝置 20 以傳輸多個互補調變光信號 102 之多芯光波導 40。多芯光波導 40 之每一芯可經配置以用類似於單模光波導、少模光波導或多模光波導之方式運行。需注意，

如本文中所使用，詞組「光耦接」意指組件能夠經由一或更多個中間媒體彼此交換光，舉例而言，諸如經由空氣交換電磁信號、經由光波導交換光信號、經由光耦合器交換光信號，等等。需進一步注意，本文中描述的實施例不必限於光波導。特定而言，光調變裝置 20 可經由一或更多個自由空間鏈路耦接至平衡光接收器。

【0028】多芯光波導 40 可包含能透射光的任何材料，舉例而言，諸如矽石纖維。多芯光波導 40 可經配置以便每一芯具有相同的群延遲。特定而言，光耦接至光調變裝置 20 的多芯光波導 40 之每一芯可傳輸多個互補調變光信號 102 至目標，以便多個互補調變光信號 102 中之每一互補調變光信號實質上同時（例如，以遠遠低於位元或符號週期之相對延遲）到達目標。在一些實施例中，多芯光波導 40 之每一芯可同時製造於相同的包覆中以減少相對延遲。

【0029】現參考第 3 圖，在一個實施例中，多芯光波導 140 可包含由矽石基玻璃形成並藉由同樣由矽石基玻璃形成的包覆材料 152 環繞之第一芯 142、第二芯 144、第三芯 146、第四芯 148，及第五芯 150。第一芯 142、第二芯 144、第三芯 146、第四芯 148 及第五芯 150 可經定向在單個平面中彼此平行並隔開，如此使相鄰芯之間的串擾相對低。包覆材料 152 橫剖面可實質上為矩形的。可由多芯光波導 140 形成橫剖面同樣實質上為矩形的光纖帶。

【0030】多個芯 142、144、146、148、150、包覆材料 152，或多個芯 142、144、146、148、150 與包覆材料 152 兩者可

經配置以緩和多個芯 142、144、146、148、150 之間的光能量之交換。舉例而言，在一個實施例中，多個芯 142、144、146、148、150 中之每一芯及包覆材料 152 之有效折射率可經調整以匹配群延遲並同時減少串擾。舉例而言，多個芯 142、144、146、148、150 及包覆材料 152 可各自包含矽石基玻璃摻雜劑，該等摻雜劑包括不限於 B、F、GeO₂、SiO₂、TiO₂、ZrO₂、Nb₂O₅ 及/或 Ta₂O₅。此等摻雜劑可要麼單獨地要麼以組合併入多個芯 142、144、146、148、150 中以便獲得所需折射率。

【0031】多個芯 142、144、146、148、150 中之每一芯可包括由外部芯部分 156 環繞的中央芯部分 154。在一個實施例中，中央芯部分 154 可具有折射率 n_{central} 且外部芯部分 156 可具有折射率 n_{outer} 。外部芯部分 156 之折射率 n_{outer} 可小於或等於中央芯部分 154 之折射率 n_{central} ，亦即，多個芯 142、144、146、148、150 中之每一芯可為階變折射率芯。多個芯 142、144、146、148、150 中之每一芯的折射率反差可由下式決定：

$$n_{\text{contrast}} = n_{\text{central}}/n_{\text{outer}} \quad (1)$$

爲了減少串擾，折射率反差可經設定爲大於約 100% 之值，舉例而言，諸如在一個實施例中達約 150%，在另一個實施例中達約 200%，在進一步實施例中達約 260%。

【0032】現參考第 4 圖，多芯光波導 240 可包含具有變化的芯直徑之第一芯 242、第二芯 244、第三芯 246、第四芯 248，及第五芯 250。舉例而言，芯直徑可在相鄰芯之間變化。在一個實施例中，第一芯 242、第三芯 246，及第五芯 250 各自可

具有第一芯直徑 $D1$ 且第二芯 244 及第四芯 248 各自可具有第二芯直徑 $D2$ 。當第一芯直徑 $D1$ 小於第二芯直徑 $D2$ 時可緩和串擾。與沿著具有相對小直徑的芯傳播之光信號相比，沿著具有相對大直徑的芯傳播之光信號可具有增加的相對延遲。爲了補償及減少延遲失配，對於第 4 圖中所示之實施例，可相對於第一芯 242、第三芯 246，及第五芯 250 之折射率反差減少第二芯 244 及第四芯 248 之折射率反差。舉例而言，針對多個芯 142、144、146、148、150 中之任一芯，可在中央芯部分 154 及/或外部芯部分 156 中調整折射率增加摻雜劑位準及折射率減少摻雜劑位準。

【0033】需注意，儘管第 4 圖中所示之實施例包括第一芯 242、第二芯 244、第三芯 246、第四芯 248，及第五芯 250，但本文中描述的多芯光波導可包括任何數目之芯。因此，本文中描述的實施例可包括經配置以達成實質上相等的延遲之各種直徑的任何數目之階變折射率芯。特定而言，每一芯可經配置以具有匹配的有效折射率。可使用用於芯中的基諧模 (LP_{01}) 之正規化傳播常數的弱導模近似值來決定有效折射率，該有效折射率由下式給出：

$$n_{index} = 1 - \frac{5.825}{(1 + (4 + V^4)^{1/4})^2} \quad (2)$$

其中 V 爲正規化頻率，該正規化頻率由下式給出：

$$V = (n_{central}^2 - n_{outer}^2)^{1/2} ka \quad (3)$$

其中 $n_{central}$ 及 n_{outer} 爲芯的內部部分及芯的外部部分之折射率， k 爲真空中量測之波數，且 a 爲芯半徑。

【0034】現參考第 5 圖，數組單模光纖剖面設計之特徵在於折射率反差（由中央芯部分與外部芯部分之間的折射率差之均方根表示）及弱導近似值中之芯直徑。曲線 62 表示具有約 2.35 的正規化頻率^V及約 1.44 的折射率^{n_{outer}}之匹配延遲的解集。曲線 64 表示具有約 2.30 的正規化頻率^V及約 1.46 的折射率^{n_{outer}}之匹配延遲的解集。曲線 66 表示具有約 2.25 的正規化頻率^V及約 1.45 的折射率^{n_{outer}}之匹配延遲的解集。因為曲線 62、曲線 64 及曲線 66 中之每一曲線代表具有固定^V數之解集，所以曲線 62、曲線 64 及曲線 66 中之每一曲線代表解，該等解將展示實質上相同的傳播常數、用於該模式的實質上相同的有效折射率，並因此展示飛行延遲的實質上匹配時間，該傳播常數、該有效折射率及該匹配時間可最小化相對延遲。需注意，儘管 2.405 以下的^V數大體上對應於單模操作，但本文中描述的實施例可利用操作於高階模式下的芯。此外，可存在數個模式耦合族，其中較高階模式的傳播延遲與本文中上述的基諧模匹配。

【0035】共同參考第 6A 圖至第 6C 圖，本文中描述的實施例可包括實質上各向同性的芯 342，舉例而言，諸如與階變折射率芯（例如，多個芯 142、144、146、148、150（第 3 圖））相比具有實質上恆定的折射率之芯或具有相對地逐漸變化的折射率之芯。舉例而言，串擾障壁可位於實質上各向同性的芯 342 的兩個或兩個以上緊密隔開的芯之間以吸收、散射或隔離自實質上各向同性的芯 342 中之每一芯發出之光。

【0036】參考第 6A 圖，在一個實施例中，多芯光波導 340

中的實質上各向同性的芯 342 中之每一芯可由串擾障壁環 158 至少部分地環繞。特定而言，串擾障壁環 158 可具有實質上環形的橫剖面。在進一步實施例中，串擾障壁環 158 可具有適於緩和相鄰芯之間的光能量之交換的任何橫剖面，舉例而言，諸如，實質上多邊形形狀的或封閉式不規則形狀的邊界。可由引起包覆材料 152 的折射率中之不連續性之任何材料形成串擾障壁環 158。用於引起不連續性的合適材料包括散射體（例如，空氣孔、氣孔、奈米氣泡、微氣泡，等等）、吸收材料（例如，摻雜劑、染料、色心、半導體微晶體、半導體奈米晶體、乙炔氣體、鉕離子，等等）、光反射界面（例如，抗諧振光波導（ARROW）、波導、用於折射率環溝之改變的摻雜區域、氟摻雜的區域、用於實質上總體內部反射之氣穴，或用於總體內部反射之氣道）、光帶隙，及上述諸者之組合。在第 6B 圖所示之替代實施例中，多芯光波導 440 可包含經配置以環繞複數個實質上各向同性的芯 342 之串擾障壁環 258。需注意，儘管串擾障壁環 158 及串擾障壁環 258 在第 6A 圖、第 6B 圖及第 7 圖中圖示為虛線，但串擾障壁環 158 及串擾障壁環 258 大體上經形成以具有有限厚度。不受理論束縛，據信，隨著串擾障壁環 158 或串擾障壁環 258 之厚度增加，緩和串擾之效力改良，但可損害波導強度。因此，合適厚度可較佳地在自約 1 奈米至約 2 微米的範圍中。此外，需注意，第 6A 圖所示的串擾障壁環 158 之結構可能對於串擾緩和係較佳的，因為該結構提供歸因於對稱性之額外優點。

【0037】再次參考第 6C 圖，多芯光波導 540 可包含一或更多

個光隔離區域 358。光隔離區域 358 可為包覆材料 152 中的任何離散區域，該區域引起包覆材料 152 的折射率中之不連續性。在一個實施例中，光隔離區域 358 可為實質上矩形形狀的且具有大於或等於相鄰芯直徑的長度 $D3$ 。據信，使長度 $D3$ 實質上等於相鄰芯直徑可改良製造超過長度 $D3$ 實質上大於或實質上小於相鄰芯直徑之實施例。在芯經設計具有較高折射率反差之實施例中，長度 $D3$ 可小於相鄰芯直徑，其中僅對串擾緩和產生小的有害效應。可由上述吸收材料或光反射界面中之任一者形成光隔離區域 358。舉例而言，在第 6C 圖中所示的實施例中，可由光反射界面形成，舉例而言，諸如折射率溝槽、空氣隙，或氣隙。

【0038】現參考第 7 圖，需注意，經由包覆材料 152 的折射率中的不連續性形成之任何串擾壁障可與任何類型的芯材料一起使用。在一個實施例中，多芯光波導 640 可包括第一芯 242、第二芯 244、第三芯 246、第四芯 248，及第五芯 250，如上文參考第 4 圖所述。可實質上由串擾障壁環 158 環繞第一芯 242、第二芯 244、第三芯 246、第四芯 248，及第五芯 250 中之每一芯。多芯光波導 640 可進一步包含安置於第一芯 242 與第二芯 244、第二芯 244 與第三芯 246、第三芯 246 與第四芯 248，以及第四芯 248 與第五芯 250 中之每一者之間的光隔離區域 358。

【0039】再次參考第 1 圖，用於光差動信號之系統 10 可包含光耦接至多芯光波導 40 之平衡光接收器 60。平衡光接收器 60 經配置以用兩個或兩個以上標稱相同的光偵測器接收具有

差動振幅調變之兩個或兩個以上光信號。匹配的光偵測器大體上具有用於實質上類似的偵測參數之設計，該等偵測參數諸如耦合損耗、複阻抗（亦即，電容與電感）、信號增益、RF 振幅、相位頻率回應、回應速度、靈敏度、響應度、暗電流，或上述諸者之組合。不受任何特定理論束縛，據信，匹配的光偵測器可提供改良的感測靈敏度。每一匹配的光偵測器可包含任何裝置，該任何裝置經配置以偵測光並將所偵測光轉換為表明所偵測光的特性（例如，光功率）之信號。

【0040】因此，平衡光接收器 60 可包括一或更多個光偵測器，舉例而言，諸如光電二極體、光敏電阻器、光電晶體，等等。需注意，儘管平衡光接收器 60 在本文中經描述與振幅調變信號一起使用，但平衡光接收器 60 可經配置以偵測相位調變互補信號、頻率或波長調變互補信號，或偵測差動空間模。舉例而言，平衡光接收器 60 可包括位於光偵測器與多芯光波導 40 之間用於偵測相位調變互補信號之多個相位敏感鑒別器（例如，MZI）。另外，平衡光接收器 60 可包括用於偵測頻率或波長調變互補信號之多埠帶緣濾波器。此外，空間調變，平衡光接收器 60 可包括光偵測器，該等光偵測器佈置於光偵測區域中（諸如同心環形區域或其他空間剖面），取決於光纖波導是否具有環形對稱性及源之模態特性。

【0041】再次參考第 2 圖，示意性圖示用於差動信號之系統 110 的實施例。系統 110 可視情況包含光耦接至光調變裝置 120 的光輸入埠 122 之等幅波光源 112（例如，等幅波半導體鐳射裝置，等等）。系統 110 可進一步包含以通信方式耦接

至光調變裝置 120 的第一電極 132 之電信號產生器 114，而光調變裝置的第二電極 134 及第三電極 136 以通信方式耦接至電接地。取決於由電信號產生器 114 傳輸的電信號可啟動第一光輸出埠 128、第二光輸出埠 130，或第一光輸出埠 128 與第二光輸出埠 130 兩者。第一光輸出埠 128 與第二光輸出埠 130 可經由多芯光波導 40 光耦接至平衡光接收器 160。或者，第一光輸出埠 128 與第二光輸出埠 130 可經由兩個個別光纖（例如，單模光纖、多模光纖，或少模光纖）光耦接至平衡光接收器 160，該兩個個別光纖具有實質上相等的長度以便該兩個光纖之間的差動群延遲小於約光信號之一個週期。

【0042】 在第 2 圖所示的實施例中，平衡光接收器 160 可包含兩個匹配的光偵測器 162。匹配的光偵測器 162 的電輸出可以通信方式耦接至電信號合併器 164，舉例而言，諸如差動放大器。電信號合併器 164 可以通信方式耦接至濾波裝置 166，諸如低通濾波器，等等。濾波裝置 166 可以通信方式耦接至限幅電路 168 或比較器電路，該限幅電路 168 或比較器電路經配置以比較接收信號與零電流臨限值以便做出關於接收符號之決策。限幅電路或比較器電路可為任何電裝置，該電裝置經配置以自接收信號移除所需部分的某些部分，舉例而言，諸如削波器、振幅選擇器或限制器。當入射差動信號的振幅、相位及雜訊特性實質上匹配時，可最大化接收器決策之效能。若入射差動信號的振幅、相位及雜訊特性未匹配，則最佳振幅決策臨限值及決策相位點可自零電流狀態移開且同樣可適時輕微移動。因此，需注意，可實施對臨限值（在

振幅或相位之臨限值)的調整來解釋實體硬體實施中的不完美性。

【0043】系統 110 可經配置用於 M 階 (亦即, 二元、四元, 及任何其他 2^k 位準信號) 差動光信號。在一個實施例中, 系統 110 可經配置用於脈波振幅調變 (Pulse Amplitude Modulation; PAM)。PAM 係線性調變機制, 由此資訊可經編碼為載波信號的振幅之離散變化。M 階 PAM 信號波形之時域表示可由下式給出:

$$s_m(t) = \Re\{A_m g(t) e^{j\omega_s t}\}, m = 1, 2, \dots, M, \quad 0 \leq t < T \quad (4)$$

其中 $\Re\{\}$ 表示實數部分, ω_s 為載波角頻率, T 為符號週期, $g(t)$ 為符號脈波形狀, 且 A_m 為自該集合取離散值的信號振幅

$$A_m \in \{(2\ell - 1 - M)d, \quad \ell = 1, 2, \dots, M\} \quad (5)$$

其中 $2d$ 為相鄰信號振幅之間的距離。

【0044】現參考第 8 圖, 以圖表圖示用於矩形不歸零脈波的基頻 ($\omega_s = 0$) 四元 PAM (QPAM) 信號。QPAM 信號 68 具有在連續的符號週期中取值 $\{-3, -3, 1, -3, -1, 1, -1, -1, 3, 1, 1, 3, 3, -1, -3, 3\}$ 的振幅。

【0045】在一些實施例中, 基頻 QPAM 信號可由具有位元週期 T 及係數比 2:1 的兩個同步二元波形 $v_1(t), v_2(t)$ 的線性重疊產生, 如下式給出:

$$V(t) = 2v_1(t) + v_2(t) = 2 \sum_k \alpha_k g(t - kT) + \sum_k \beta_k g(t - kT) \quad (6)$$

其中藉由自集合 $\{\pm 1\}$ 取離散值來界定二元波形振幅 α_k, β_k 。需注意, 儘管上述實例為清楚起見描述了特定的係數比, 但本文

中描述的實施例不限於任何特定的係數比。

【0046】 返回參考第 2 圖，如上文提及，光調變裝置 120 可為電-光材料形成的 MZM。在典型的 MZM 中，輸入埠可光耦接至具有不同有效長度的光路徑。可沿著每一光路徑分裂及傳輸輸入信號。可在輸出處再次重組分裂信號。兩個相移版本之光信號的重疊在每一裝置輸出埠處產生干擾。若兩個相鄰位元有益地彼此干擾，則干擾可導致在輸出埠處存在功率。相反，若兩個相鄰位元無益地彼此干擾，則干擾可導致在輸出埠處不存在功率。MZM 可具有用於傳輸互補輸出信號的兩個輸出埠，亦即，當一個輸出埠中存在無益干擾時，歸因於能量轉換，另一個輸出埠中存在有益干擾。

【0047】 為清楚起見，且不使本文中描述的實施例限於任何數學理論，以下提供用於以 LiNbO_3 形成的電-光 MZM 之數學模型。等幅波光源 112 可傳輸光信號至光調變裝置的光輸入埠 122 中。光輸入埠 122 處的光信號之電場可由下式給出：

$$E_{in}(t) = E_0 e^{j\omega_s t} \quad (7)$$

其中 E_0 為電場振幅，且 ω_s 為載波角頻率。

【0048】 隨後可將光信號分裂為穿越第一光路徑 124 及第二光路徑 126 之兩個相等部分。兩個信號部分可經受差動相位延遲 $\phi(t)$ 。差動相位延遲可表達為歸因於傳播 ϕ_0 的相移及歸因於隨電壓變化的折射率（勃克爾斯（Pockels）效應）的相移之總和，該隨電壓變化的折射率係歸因於偏壓電壓 $V(t)$ 之施加

（如施加至第一電極 132），差動相位延遲可由下式給出：

$$\phi(t) = \phi_0 - \pi \frac{V(t)}{V_\pi} \quad (8)$$

其中歸因於傳播的相移由下式給出：

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} nL \quad (9)$$

歸因於隨電壓變化的折射率的相移之特徵在於電壓比 $\frac{V(t)}{V_\pi}$ ，其中 V_π 由下式給出：

$$V_\pi = \frac{\lambda_0 d}{rn^3 L} \quad (10)$$

其中 λ_0 為輸入光束之自由空間波長， L 為裝置長度， d 為電極之間的距離， n 為不存在電壓時的有效折射率，且 r 為勃克爾斯電-光係數。常數 V_π 通常稱為半波電壓。

【0049】 忽略 MZM 中的傳播損耗，第一光輸出埠 128 及第二光輸出埠 130 處的電場可由下式給出：

$$\begin{pmatrix} E_{o,1}(t) \\ E_{o,2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \frac{\phi(t)}{2} \\ \cos \frac{\phi(t)}{2} \end{pmatrix} E_{in}(t) \quad (11)$$

【0050】 假設平衡光接收器 160 之匹配的光偵測器 162 為理想的二次偵測器。藉由平衡光接收器 160 偵測的瞬時光功率可由下式給出：

$$\begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin^2 \frac{\phi(t)}{2} \\ \cos^2 \frac{\phi(t)}{2} \end{pmatrix} P_{in} \quad (12)$$

其中 P_{in} 為光調變裝置的光輸入埠 122 處的光信號之平均功率。

【0051】 因為光電二極體背對背連接，所以可假設匹配的光偵測器 162 具有相同的響應度 R ，平衡光接收器 160 的輸出處的總光電流可由下式給出：

$$i_{tot}(t) = R[P_1(t) - P_2(t)] = R \left[\sin^2 \frac{\phi(t)}{2} - \cos^2 \frac{\phi(t)}{2} \right] P_{in} = -RP_{in} \cos \phi(t) \quad (13)$$

【0052】 用於差動光信號之系統 110 可用於產生二元 PAM

(BPAM) 光信號。可假設歸因於傳播的相移為：

$$\varphi_0 = 2k\pi \quad (14)$$

控制光調變裝置 120 的偏壓電壓^{V(t)}可為由下式給出的二元波形：

$$V(t) = \frac{V_\pi}{2} + \frac{V_\pi}{2} \sum_k \alpha_k g(t - kT) \quad (15)$$

其中二元波形振幅 ^{α_k} 自集合 ^{$\{\pm 1\}$} 取離散值。方程式(15)右手側的常數項可稱為 DC 偏壓，且方程式(15)右手側的時變項可稱為 RF 偏壓。

【0053】用於差動光信號之系統 110 可用於產生 QPAM 光信號。可關於歸因於傳播的相移做出與以上方程式(14)中表達相同之假設。對於 QPAM，偏壓電壓^{V(t)}可為四元波形，該四元波形經表達為具有位元週期^T及係數比^{A:B}的兩個同步二元波形之線性重疊，偏壓電壓可由下式給出：

$$V(t) = \frac{V_\pi}{2} + \frac{V_\pi}{2} \left[A \sum_k \alpha_k g(t - kT) + B \sum_k \beta_k g(t - kT) \right] \quad (16)$$

【0054】在一些實施例中，為了解釋 MZM 轉移函數的非線性，若需要在平衡光接收器 160 的輸出處產生四個等距電流位準，用於二元電壓波形的重疊之係數比^{A:B}不應當為 2:1。因此，藉由電信號產生器 114 預先加強電信號輸出可用於產生具有四個非等距電壓位準的電驅動器基頻 QPAM 信號。當由 MZM 形成光調變裝置時，四元波形的最大峰間電壓振幅應當為 MZM 的半波電壓之大約兩倍。

【0055】為了計算用於電壓波形的重疊之係數比^{A:B}，可假設平衡光接收器 160 的輸出處之總光電流自以下集合取離散值：

$$RP_{in} \in \{-1, -1/3, 1/3, 1\} \quad (17)$$

因此，自方程式 (13)：

$$\cos \phi(t) \in \{-1, -1/3, 1/3, 1\} \quad (18)$$

反向此三角方程式的結果：

$$\phi(t) \in \{0, 1.23, 1.91, \pi\} \text{rad} \quad (19)$$

通過置換，係數 A、B 必須滿足以下方程式：

$$\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}[A+B] = \pi \text{ rad} \quad (20)$$

$$\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}[A-B] = 1.91 \text{ rad}$$

$$\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}[-A+B] = 1.23 \text{ rad}$$

$$\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}[-A-B] = 0 \text{ rad}$$

方程組 (20) 的要麼前兩個方程式要麼後兩個方程式之系統的解得出 $A = 0.608173, B = 0.391827$ 。因此，針對 QPAM 信號，可將係數 A、B 設為約等於派生值。

【0056】現參考第 9 圖，用於差動信號之系統 210 的一個實施例可用於產生 M-PAM 光信號，亦即，具有 2^m 位準之信號。系統 210 可包括 m 個光調變裝置 120 及 m 個平衡光接收器 160 之陣列，以避免在發射器處產生多位準電子波形。需注意，儘管光調變裝置 120 及平衡光接收器 160 中之每一者在第 9 圖中經圖示為藉由 m 個不同的多芯光波導 40 光耦接，但光調變裝置 120 及平衡光接收器 160 可經由一或更多個多芯光波導 40 耦接。

【0057】在一個實施例中，系統 210 可包括 m 個相同的並聯支路。每一支路可經配置以產生獨立的 BPAM 光信號，如上文參考第 2 圖所述。特定而言，在每一支路 212 中，等幅波

光源 112 可光耦接至光調變裝置 120。在一個時間間隔處，可在每一支路 212 的平衡光接收器 160 處偵測對應於以下位元之 m 個獨立的位元序列：

$$b_1, \dots, b_m \in \{0,1\} \quad (21)$$

可將該等位元視為 M 階符號 $c_k = (b_1 \dots b_m)_2$ 的以 2 為底數之表示。驅動馬赫耳-曾德調變器的相應偏壓電壓 $V_\ell(t), \ell = 1, \dots, m$ 具有與方程式 (15) 相同之形式。

【0058】現參考第 10 圖，用於差動信號之系統 310 的另一個實施例可將由 LiNbO_3 形成的 $1 \times m$ 超快交換網狀架構用作光調變裝置以用於產生具有 2^m 位準之 M -PAM 光信號。舉例而言，在第 10 圖所示的實施例中，光調變裝置 320 可為用於產生 QPAM 信號之 1×4 超快交換網狀架構。光調變裝置 320 可包含級聯佈置的 1×2 Y 型支路交換器的第一級 322 與第二級 324，亦即，交換器的每一臂可為下一級之輸入。

【0059】第一級 322 可包含光耦接至等幅波光源 112 之第一 Y 型支路交換器 312。第一 Y 型支路交換器 312 可以通信方式耦接至控制第一 Y 型支路交換器 312 之電信號產生器 114。第一 Y 型支路交換器 312 可根據電信號產生器 114 之輸出在第一 Y 型支路交換器 312 之上臂 b_1 或下臂 $\bar{b}_1$ 中將光信號攪拌為位元。舉例而言，若輸出為電二元信號，則一可對應於 Y 型支路交換器 312 之上臂 b_1 且零可對應於 Y 型支路交換器 312 之下臂 $\bar{b}_1$ 。

【0060】第二級 324 可包含光耦接至第一 Y 型支路交換器 312 的上臂 b_1 之第二 Y 型支路交換器 314，及光耦接至第一 Y

型支路交換器 312 的下臂 ^{$\bar{b}_1$} 之第三 Y 型支路交換器 316。第二 Y 型支路交換器 314 及第三 Y 型支路交換器 316 可以通信方式耦接至電信號產生器 214 用於控制。第二 Y 型支路交換器 314 及第三 Y 型支路交換器 316 可根據電信號產生器 214 之輸出在第二 Y 型支路交換器 314 及第三 Y 型支路交換器 316 的上臂 ^{b_2} 或下臂 ^{$\bar{b}_2$} 之任一者中攪拌來自第一 Y 型支路交換器 312 之輸入。舉例而言，若輸出為電二元信號，則一可對應於第二 Y 型支路交換器 314 及第三 Y 型支路交換器 316 中之每一者的上臂 ^{b_2} 且零可對應於第二 Y 型支路交換器 314 及第三 Y 型支路交換器 316 中之每一者的下臂 ^{$\bar{b}_2$} 。

【0061】因此，可藉由第一二元序列控制第一級 322 的第一 Y 型支路交換器 312，且可藉由第二二元序列平行控制第二級 324 的第二 Y 型支路交換器 314 及第三 Y 型支路交換器 316。每隔一個位元週期 ^{T} 可重設所有三個 Y 型支路交換器 312、314、316 之狀態。假設在特定時間間隔處，兩個二元序列由位元 ^{$b_1, b_2 \in \{0,1\}$} 組成。可由 ^{$\bar{b}_1, \bar{b}_2$} 指代互補位元。藉由匹配的光偵測器 162 偵測的瞬時光功率可由以下方程組給出：

$$\begin{aligned} P_1(t) &= b_1^2 b_2^2 P_{in} \\ P_2(t) &= b_1^2 \bar{b}_2^2 P_{in} \end{aligned} \quad (22)$$

$$P_3(t) = \bar{b}_1^2 b_2^2 P_{in}$$

$$P_4(t) = \bar{b}_1^2 \bar{b}_2^2 P_{in}$$

其中 ^{P_{in}} 為藉由光調變裝置 320 的第一級 322 之第一 Y 型支路交換器 312 接收的光信號之平均功率。

【0062】每一匹配的光偵測器 162 可以通信方式耦接至增益

裝置 326 的陣列，增益裝置 326 各自具有可配置的增益 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 。平衡接收器 360 的輸出處之總光電流可由下式給出：

$$i_{tot}(t) = R[G_1P_1(t) + G_2P_2(t) - G_3P_3(t) - G_4P_4(t)] \quad (23)$$

【0063】藉由為每一增益裝置 326 選擇適當增益 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 ，平衡接收器 360 的輸出可產出 M 階信號。特定而言，通過設定 $G_1 = G_4 = 1, G_2 = G_3 = 1/3$ ，來自平衡接收器 360 之最終光電流輸出可為 QPAM 信號。需注意，儘管第 10 圖中所示的系統 310 之實施例包含經配置用於 QPAM 信號之 1×4 交換網狀架構，但本文中描述的實施例可藉由包括用於較高階 M-PAM 信號的額外級而廣義化為 $1 \times m$ 交換網狀架構。

【0064】現參考第 11 圖，示意性圖示用於差動信號之系統 410 的進一步實施例。光調變裝置 420 可由具有巢套光調變裝置 120 的 MZI 形成。在一些實施例中，如上文所提及，每一光調變裝置 120 可由 MZM 形成。因此，可由安置在具有非對稱輸出耦合器的 MZI 內的兩個雙輸出 MZM 形成光調變裝置。

【0065】在一個實施例中，等幅波光源 112 可光耦接至光調變裝置 420 之光輸入埠 422。可將光輸入埠 422 分裂為第一光路徑 424 及第二光路徑 426。第一光路徑 424 及第二光路徑 426 中之每一者可光耦接至光調變裝置 120。如上文所述，每一光調變裝置 120 可具有第一光輸出埠 128 及第二光輸出埠 130。光調變裝置 120 的第一光輸出埠 128 中之每一者可經合併且光耦接至光調變裝置 420 的第一光輸出埠 428。類似地，光調變裝置 120 的第二光輸出埠 130 中之每一者可經合併且

光耦接至光調變裝置 420 的第二光輸出埠 430。

【0066】第一電信號產生器 114 可以通信方式耦接至一個光調變裝置 120，且第二電信號產生器 214 可以通信方式耦接至另一個光調變裝置 120。電信號產生器 114、214 可經配置以產生二元波形以便獨立地控制光調變裝置 120。二元波形可表達如下：

$$\begin{aligned} v_1(t) &= V_\pi \sum_k \alpha_k g(t - kT) \\ v_2(t) &= V_\pi \sum_k \beta_k g(t - kT) \end{aligned} \quad (24)$$

其中二元波形振幅 α_k, β_k 自集合 $\{0,1\}$ 取離散值。

【0067】忽略光調變裝置 420 中的傳播損耗且假設輸出耦合器的振幅耦合比等於 $A:B$ ，第 k 個時間間隔處的互補調變光信號 102 之電場可由下式給出：

$$\begin{pmatrix} E_{o,1}(t) \\ E_{o,2}(t) \end{pmatrix} = \frac{j}{2} \begin{pmatrix} \alpha_k A + j\beta_k B \\ j\bar{\alpha}_k A + \beta_k B \end{pmatrix} E_{in}(t) \quad (25)$$

【0068】可將互補調變光信號 102 傳輸至平衡光接收器 160 並由平衡光接收器 160 接收。可假設平衡光接收器 160 包含光電二極體，該等光電二極體為理想的二次偵測器。因此，藉由平衡光接收器 160 偵測的瞬時光功率可由下式給出：

$$\begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} \alpha_k^2 A^2 + \beta_k^2 B^2 \\ \bar{\alpha}_k^2 A^2 + \beta_k^2 B^2 \end{pmatrix} P_{in} \quad (26)$$

其中 P_{in} 為光調變裝置 420 的光輸入埠 422 處的光信號之平均功率。

【0069】平衡光接收器 160 可包括兩個平衡光電二極體，且可假設每一平衡光電二極體具有實質上相同的響應度 R 。此外，光電二極體可背對背連接。因此，平衡光接收器 160 的

輸出處之總光電流可由下式給出：

$$i_{tot}(t) = R[P_1(t) - P_2(t)] = \frac{RP_{in}}{4}[(\alpha_k^2 - \bar{\alpha}_k^2)A^2 + (\beta_k^2 - \bar{\beta}_k^2)B^2] \quad (27)$$

【0070】藉由選擇 $A = \sqrt{3/2}$, $B = 1$, 總光電流可經配置以產生 QPAM 信號。

【0071】按照每位元所需的接收平均光能量，可將 M 階 PAM 差動信號之效能與習知 M 階強度調變 (IM) / 直接偵測 (DD) 相比較。假設在來自光接收器前端的輸出處之電光電流可寫作脈波列，由下式給出：

$$i(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} I_m g(t - mT_s) + n(t) \quad (28)$$

其中 I_m 為對應於第 m 個接收符號之光電流（亦即， $I_m = RP_m$ ，其中 R 指代光電二極體響應度，且 P_m 指代用於第 m 個符號之接收光功率）， T_s 為符號週期， $n(t)$ 為接收器散粒及熱雜訊，且 $g(t)$ 為脈波形狀。

【0072】可進一步假設散粒雜訊及熱雜訊兩者為加性白色高斯雜訊。另外，脈波形狀可為辛克 (sinc) 脈波形狀之理想化實例，由下式給出：

$$g(t) = \sin(\pi t/T_s)/(\pi t/T_s) \quad (29)$$

辛克脈波屬於滿足奈奎斯 (Nyquist) 的零符號間干擾 (ISI) 標準之上升余弦波譜脈波族。辛克脈波的波譜 $G(f)$ 為實質上矩形的

$$G(f) = T_s, |f| \leq 1/2T_s \quad (30)$$

此外，可假設 DD 接收器前端跟隨有具有單位轉移函數之匹配的低通濾波器：

$$H(f) = 1, |f| \leq 1/(2T_s) \quad (31)$$

在匹配的濾波器之輸出處，接收器決策電路可各符號一次對光電流取樣：

$$i(kT_s) = I_k + n_k \quad (32)$$

其中 $n_k = n(kT_s)$ 為接收器散粒及熱雜訊之濾波的樣本。後者遵循具有零均值及方差之高斯分佈：

$$\sigma_k^2 = \sigma_{sh,k}^2 + \sigma_{th}^2 \quad (33)$$

其中 $\sigma_{sh,k}^2, \sigma_{th}^2$ 為第 k 個符號的散粒及熱光電流雜訊之方差。用於光互連的 IM/DD 接收器可操作深入至熱雜訊限制，其中散粒雜訊方差比熱雜訊方差小一數量級。因此，可做出以下簡化：

$$\sigma_k^2 \cong \sigma_{th}^2 = 2i_{th}^2 B \quad (34)$$

其中 i_{th} 為等價輸入電雜訊電流功率譜強度之均方根值，表達為 $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，且 B 為匹配的濾波器帶寬， B 等於：

$$B = 1/(2T_s) \quad (35)$$

值得注意的是，歸因於匹配的濾波器之形狀，方程式 (34) 中的濾波的接收器散粒及熱雜訊之連續樣本係不相關的。

【0073】對於 M 階 PAM，在不存在熱雜訊之情況下，接收器輸出處的光電流之樣本可對應於 M 個明顯等距的位準 $I_0 - I_{M-1}$ 。可使用葛雷編碼法 (Gray encoding) 將 $k = \log_2 M$ 位元的字組指派至不同的光電流位準，亦即，對應於相鄰信號位準之字組可相差一個位元。在存在熱雜訊之情況下，接收器輸出處的光電流之樣本不同於該等樣本之標稱位置。可將決策臨限值放置於連續位準之間的中間點處。

【0074】因此，能夠根據下式計算 M 階 PAM 差動信號及習

知 M 階 IM/DD 兩者之位元錯誤機率 ^{P_{elb}} ：

$$P_{elb} = (M-1) \operatorname{erfc} \left[\sqrt{d^2 / (2\sigma_{th}^2)} \right] / (M \sqrt{\log_2 M}) \quad (36)$$

其中 ^{$2d$} 為相鄰電流位準之間的距離，且互補誤差函數由下式給出：

$$\operatorname{erfc}(z) = (2/\sqrt{\pi}) \int_z^\infty e^{-t^2} dt \quad (37)$$

假設對於 M 階 PAM 差動信號，電流位準自以下集合取離散值：

$$I_m \in \{(2\ell-1-M)d\}, \quad \ell = 1, 2, \dots, M, \quad (38)$$

然而對於習知 M 階 IM/DD，電流位準自以下集合取離散值：

$$I_m \in \{2\ell d\}, \quad \ell = 0, 2, \dots, M-1. \quad (39)$$

兩種情況下之相應接收平均功率可由下式表達：

$$\bar{P}_{M-PAM} = \bar{P}_{M-IM/DD} = (M-1)d/R \quad (40)$$

M 階 PAM 差動信號及習知 IM/DD 可具有相同的接收器靈敏度。然而，在 M 階 PAM 差動信號情況下，由於互補調變光信號，等幅波光源的平均傳輸功率可比等幅波光源的習知 IM/DD 副本低 3 dB。舉例而言，使用來自 MZM 的輸出耦合器的兩個支路之光功率。

【0075】來自相同調變族中的二元實例之位準數的增加可包括極低錯誤機率下的漸近光能量/b 損失，可由下式給出：

$$P_d = 10 \log[(M-1)/\sqrt{\log_2 M}] \quad (41)$$

現參考第 12 圖，光能量/b 損失經繪製為位準數之函數。舉例而言，與二元實例相比，光能量/b 損失自二元轉變至 QPAM 為約 3.26 dB。

【0076】基於以上所述，據信，與習知的 IM/DD 鏈路相比，

使用 BPAM 差動光信號可減少 3 dB 光能量消耗。此外，據信，使用 QPAM 差動信號可交換 3-dB 的光能量優勢，以便與習知的二元 IM/DD 比較將符號率減半。線率的減少可導致減少組分成本、使鏈路抵抗色散的穩健性變成四倍，且減少收發機電子裝置的能量散逸。

【0077】現應理解，本文中描述的實施例可用於差動光信號。本文中描述的系統可包括光耦接至平衡光接收器以產生 M 階 PAM 信號之光調變裝置（例如，MZM 或 MZI）。在一些實施例中，可藉由新增具有等於符號率的位元率及不相等的電壓比之複數個二元位元同步的位元序列來合成電子 M 階符號序列。在進一步實施例中，可藉由在相位中新增具有不相等的場-振幅比的多個二元 PAM 信號來合成 M 階 PAM 光信號。此外，可使用具有非對稱支路及每一支路上的外部調變器（MZM）之巢套 MZI 產生光 M 階 PAM 信號。M 階 PAM 光信號可用於減少高效能計算光互連及資料中心之總體功率消耗。特定而言，與習知的 M 階 IM/DD 相比，互補 M 階 PAM 光波形可減少 3 dB 傳輸光功率。此外，互補 M 階 PAM 光波形允許將直接偵測接收器的決策臨限值設為零，比習知的 IM/DD 顯著簡化。特定而言，決策臨限值可固定於零點交叉處，且可將 M 階 PAM 對稱地置放於彼零狀態附近。

【0078】需注意，本文中可利用術語「實質上」及「約」來表示固有程度的不確定性，該不確定性可歸因於任何定量比較、值、量測，或其他表示。本文中亦利用該等術語來表示定量表示可自所闡明的參考變化而不導致待解決標的之基本

功能中的改變之程度。

【0079】熟習此項技術者將顯而易見，在不背離所主張標的之精神及範疇的情況下，可對本文中描述的實施例做出各種修改及改變。因此，若本文中描述的各種實施例的修改及改變在隨附申請專利範圍及申請專利範圍之等效物的範疇內，本說明書意欲涵蓋此等修改及改變。

【符號說明】

【0080】

- 10 用於差動光信號之系統
- 20 光調變裝置
- 40 多芯光波導
- 60 平衡光接收器
- 62 曲線
- 64 曲線
- 66 曲線
- 68 QPAM 信號
- 100 光輸入信號
- 102 互補調變光信號
- 104 調變信號
- 110 用於差動光信號之系統
- 112 等幅波光源
- 114 電信號產生器
- 120 光調變裝置
- 122 光輸入埠

- 124 第一光路徑
- 126 第二光路徑
- 128 第一光輸出埠
- 130 第二光輸出埠
- 132 第一電極
- 134 第二電極
- 136 第三電極
- 140 多芯光波導
- 142 第一芯
- 144 第二芯
- 146 第三芯
- 148 第四芯
- 150 第五芯
- 152 包覆材料
- 154 中央芯部分
- 156 外部芯部分
- 158 串擾障壁環
- 160 平衡光接收器
- 162 光偵測器
- 164 電信號合併器
- 166 濾波裝置
- 168 限幅電路
- 210 用於差動信號之系統
- 212 支路

- 214 電信號產生器
- 240 多芯光波導
- 242 第一芯
- 244 第二芯
- 246 第三芯
- 248 第四芯
- 250 第五芯 258 串擾障壁環
- 310 用於差動信號之系統
- 312 第一 Y 型支路交換器
- 314 第二 Y 型支路交換器
- 316 第三 Y 型支路交換器
- 320 光調變裝置
- 322 第一級
- 324 第二級
- 326 增益裝置
- 340 多芯光波導
- 342 芯
- 358 光隔離區域
- 360 平衡接收器
- 410 用於差動信號之系統
- 420 光調變裝置
- 422 光輸入埠
- 424 第一光路徑
- 426 第二光路徑

428 第一光輸出埠

430 第二光輸出埠

440 多芯光波導

540 多芯光波導

640 多芯光波導

b_1 上臂

$\overline{b_1}$ 下臂

b_2 上臂

$\overline{b_2}$ 下臂

D_1 第一直徑

D_2 第二直徑

D_3 長度

G_1 增益

G_2 增益

G_3 增益

G_4 增益

【生物材料寄存】

國內寄存資訊【請依寄存機構、日期、號碼順序註記】

無

國外寄存資訊【請依寄存國家、機構、日期、號碼順序註記】

無

【序列表】(請換頁單獨記載)

無

申請專利範圍

1. 一種用於傳輸差動光信號之系統，包含：

一光調變裝置，該光調變裝置包含至少一個光輸入埠及多個光輸出埠，其中在該至少一個光輸入埠處接收具有一輸入功率之一光輸入信號，且該光調變裝置將該光輸入信號轉換為自該多個光輸出埠傳輸之多個互補調變光信號，該等互補調變光信號各自具有一輸出功率，且其中該多個互補調變光信號中之每一互補調變光信號的該輸出功率之一總和實質上等於藉由該光調變裝置的該至少一個光輸入埠接收之該光輸入信號之該輸入功率；

一多芯光波導，該多芯光波導光耦接至該光調變裝置之該多個光輸出埠，該多芯光波導包含安置於一包覆材料中之多個芯，其中該多個芯、該包覆材料或該多個芯及該包覆材料兩者可經配置以緩和該多個芯之間的光能量之交換；及

一平衡光接收器，該平衡光接收器包含多個光偵測器，其中該平衡光接收器以通信方式耦接至該多芯光波導之該多個芯，且該多個光偵測器中之每一光偵測器將該多個互補調變光信號中之至少一個互補調變光信號轉換為一電信號，且其中該平衡光接收器之該多個光偵測器之該電信號經合併以形成一脈波振幅調變信號。

2. 如請求項 1 所述之系統，其中該光調變裝置為一馬赫耳-曾德（Mach-Zehnder）調變器。

3. 如請求項 1 所述之系統，其中該光調變裝置包含複數個馬赫耳-曾德調變器，該複數個馬赫耳-曾德調變器經平行佈置以便該複數個馬赫耳-曾德調變器中之每一馬赫耳-曾德調變器傳輸該多個互補調變光信號中之一對互補調變光信號。
4. 如請求項 1 所述之系統，其中該光調變裝置係由一交換網狀架構形成。
5. 如請求項 4 所述之系統，其中該交換網狀架構包含一級聯佈置中的複數個 Y 型支路交換器。
6. 如請求項 4 所述之系統，其中該交換網狀架構係由包含 LiNbO_3 之一材料形成。
7. 如請求項 1 所述之系統，其中該光調變裝置係由具有巢套光調變器之一馬赫耳-曾德干擾儀形成。
8. 如請求項 7 所述之系統，其中巢套於該馬赫耳-曾德干擾儀中之該等光調變器為馬赫耳-曾德調變器。
9. 如請求項 1 所述之系統，其中該脈波振幅調變信號圍繞一零點交叉經對稱調變。

10. 如請求項 9 所述之系統，其中該脈波振幅調變信號為 M 階的。

11. 如請求項 9 所述之系統，其中該脈波振幅調變信號為二元的。

12. 如請求項 9 所述之系統，其中該脈波振幅調變信號為四元的。

13. 如請求項 1 所述之系統，其中該多個光偵測器為具有實質上相同的回應速度、靈敏度、響應度及暗電流之匹配的光偵測器。

14. 如請求項 1 所述之系統，其中該多個光偵測器為光電二極體。

15. 如請求項 1 所述之系統，其中該多芯光波導為一光纖帶。

16. 如請求項 1 所述之系統，其中該多芯光波導之該多個芯中之每一芯具有一匹配的有效折射率。

17. 如請求項 16 所述之系統，其中該多個芯包含摻雜有摻雜劑之矽石基玻璃。

18. 如請求項 17 所述之系統，其中該摻雜劑為 B、F、 GeO_2 、 SiO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 ，或上述諸者之組合。

19. 如請求項 1 所述之系統，其中該多芯光波導之該多個芯包含具有一相對小的直徑之一第一芯，及具有一相對大的直徑之一第二芯，且其中該第一芯為該第二芯之一相鄰芯。

20. 如請求項 1 所述之系統，其中該多芯光波導之該多個芯中之每一芯為一階變折射率芯。

21. 如請求項 1 所述之系統，其中該多芯光波導之該多個芯中之每一芯實質上由一串擾障壁環環繞。

22. 如請求項 21 所述之系統，其中該串擾障壁環由引起該包覆材料中之一折射率不連續性之一材料形成。

23. 如請求項 22 所述之系統，其中該串擾障壁環由一散射體、一吸收材料，或散射體及吸收材料之一組合形成。

24. 如請求項 1 所述之系統，其中該多芯光波導之該多個芯中之兩個或兩個以上芯實質上由一個串擾障壁環環繞。

25. 如請求項 1 所述之系統，其中一光隔離區域位於該多芯光波導之該多個芯中之兩個芯之間。

26. 如請求項 25 所述之系統，其中該光隔離區域由一光反射界面形成。

27. 如請求項 1 所述之系統，其中：

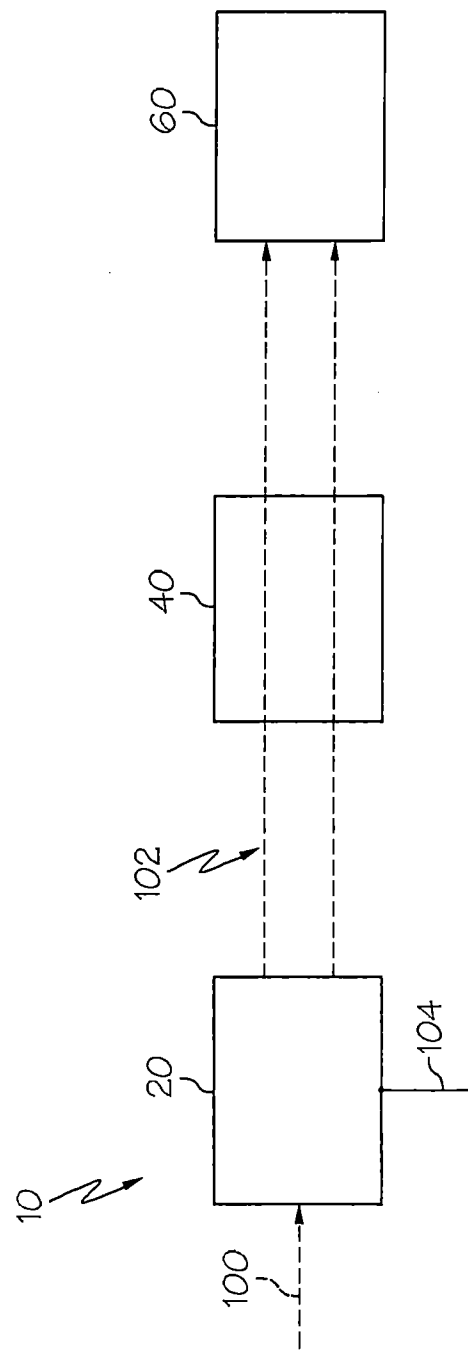
該多芯光波導之該多個芯包含具有一相對小的直徑之第一芯及具有一相對大的直徑之一第二芯；

該第一芯為該第二芯之一相鄰芯；

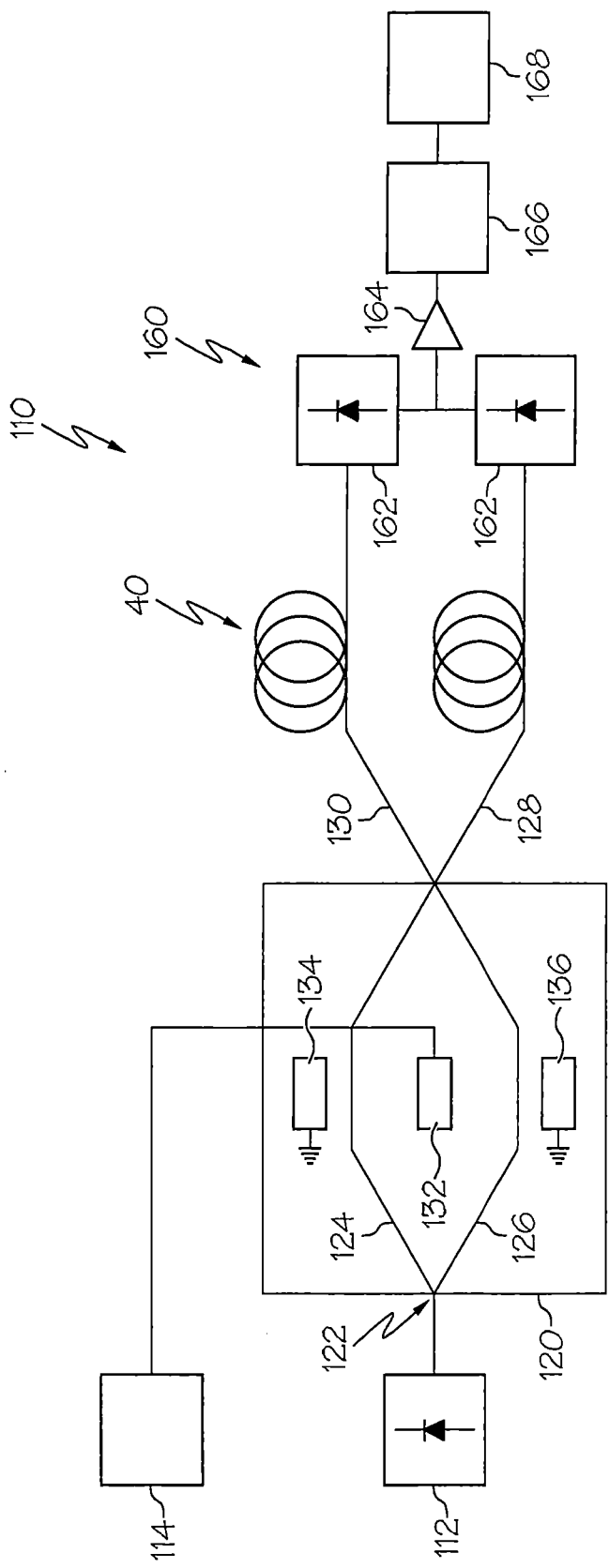
該多芯光波導之該第一芯及該第二芯中之每一芯實質上由一串擾障壁環環繞；及

一光隔離區域位於該多芯光波導之該第一芯與該第二芯之間。

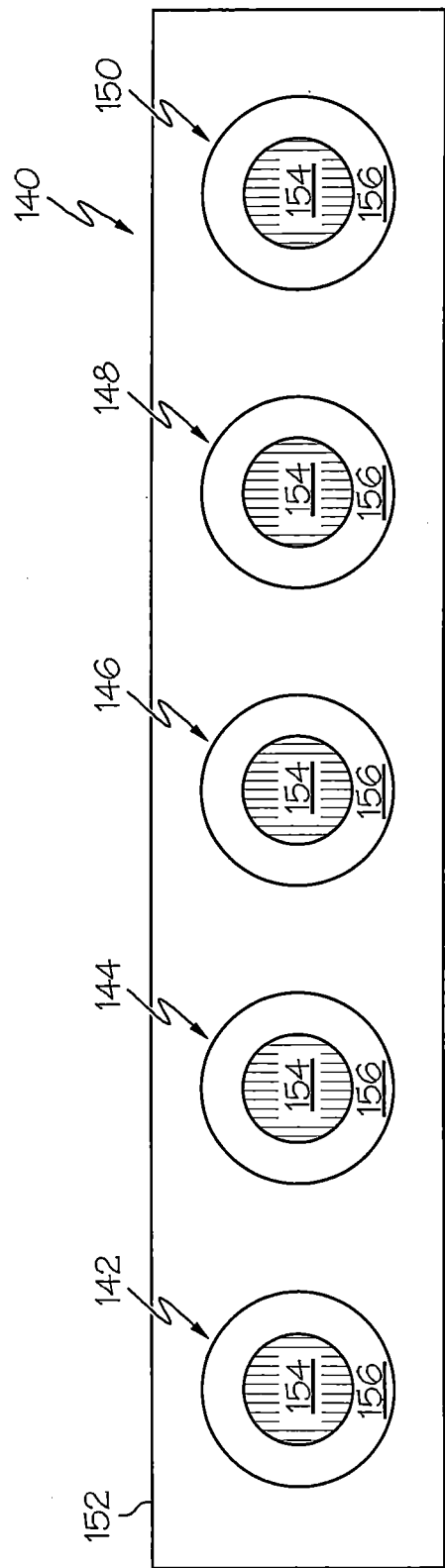
圖式



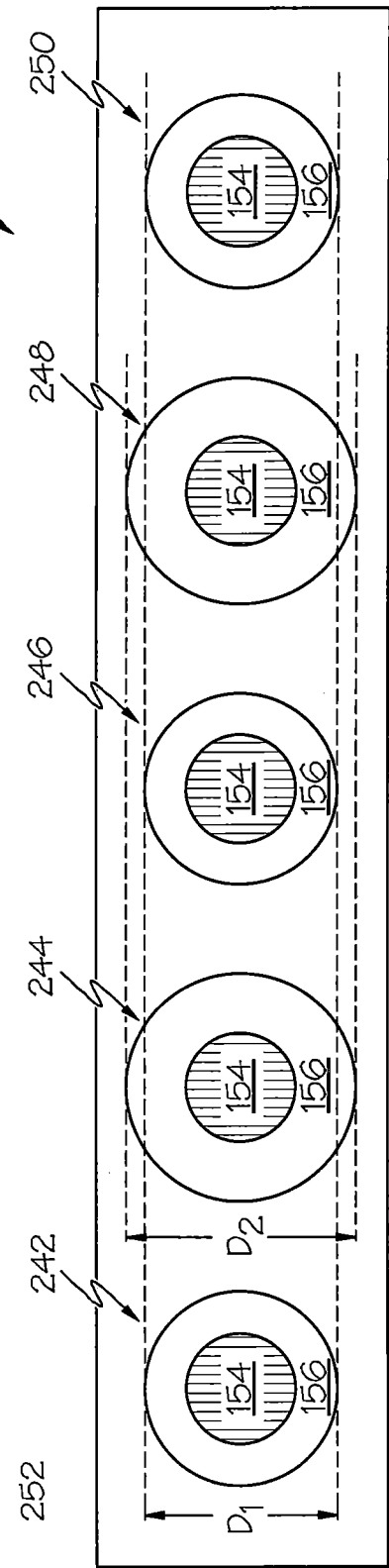
第1圖



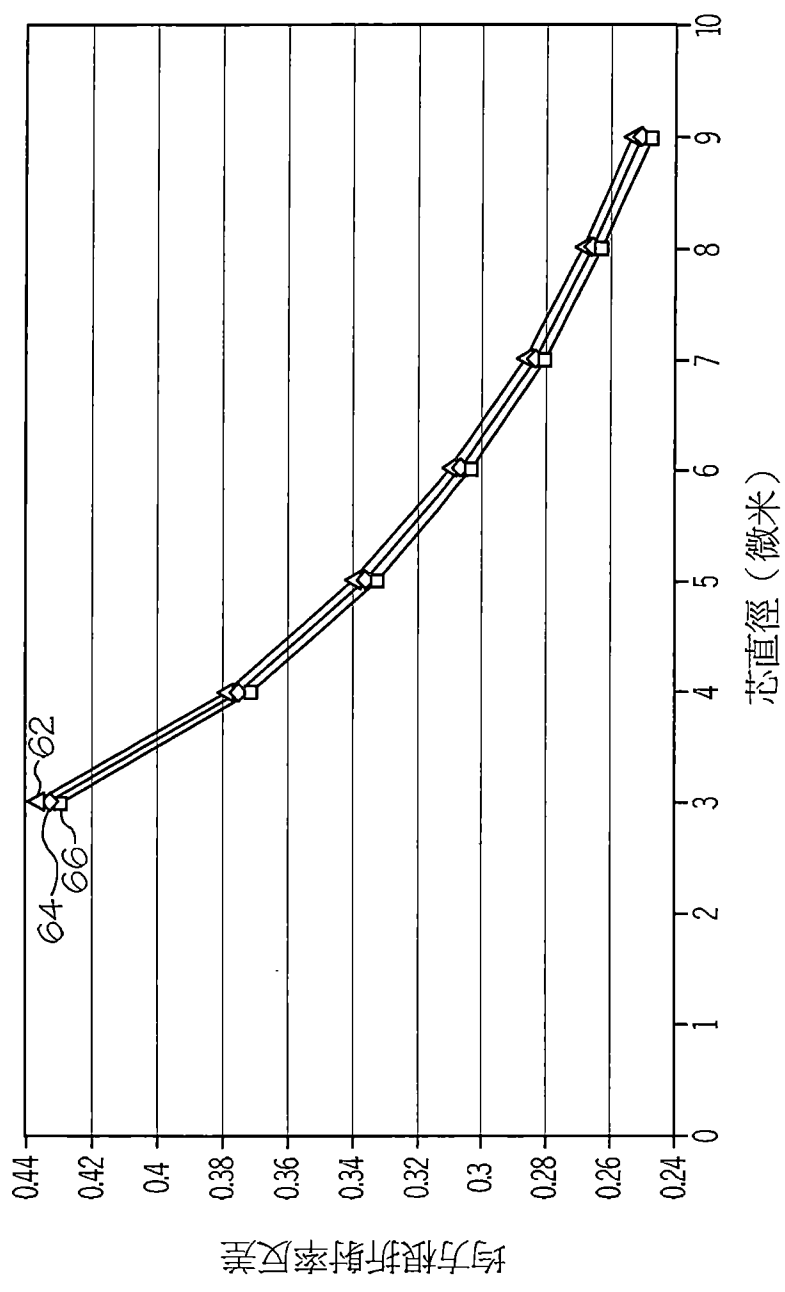
第2圖



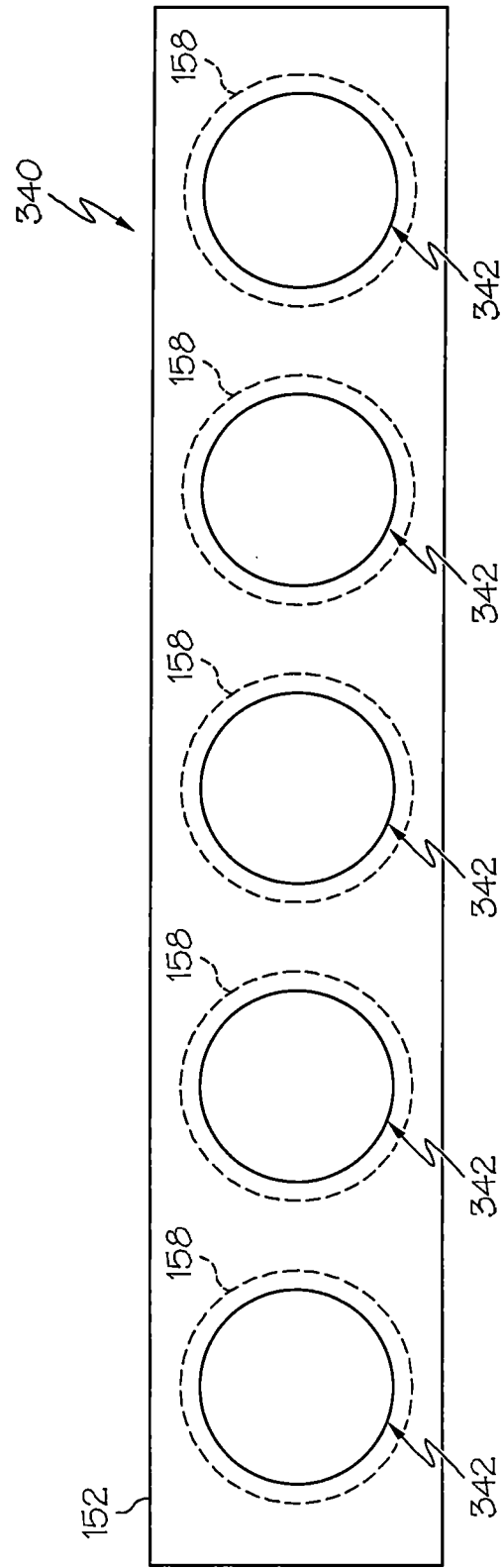
第3圖



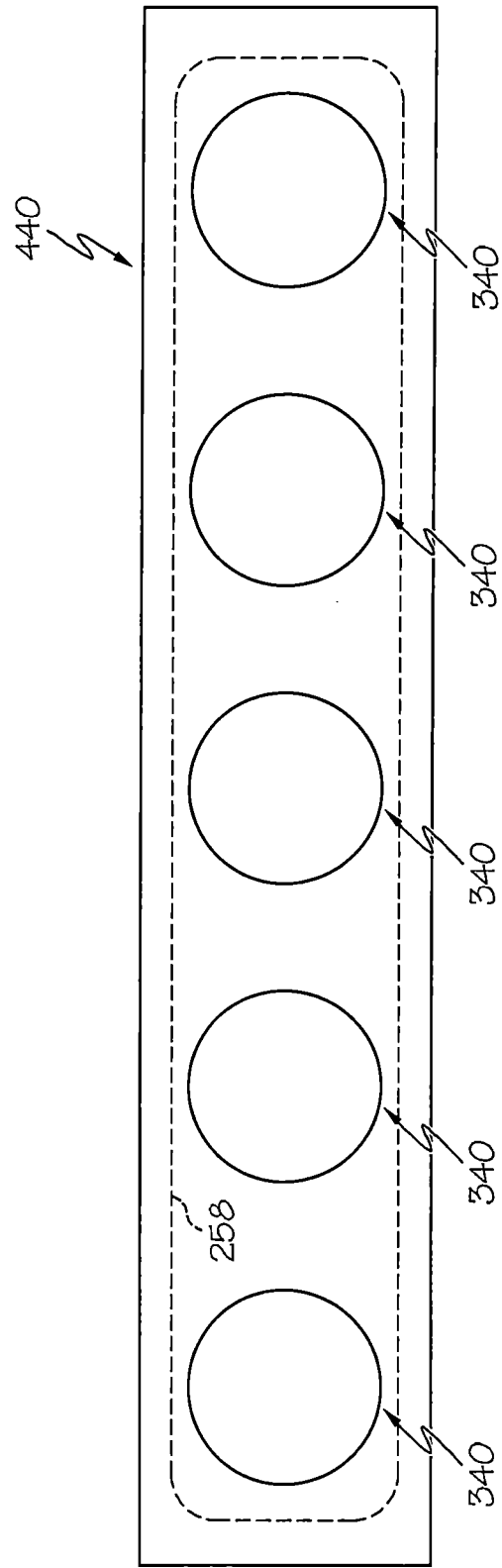
第4圖



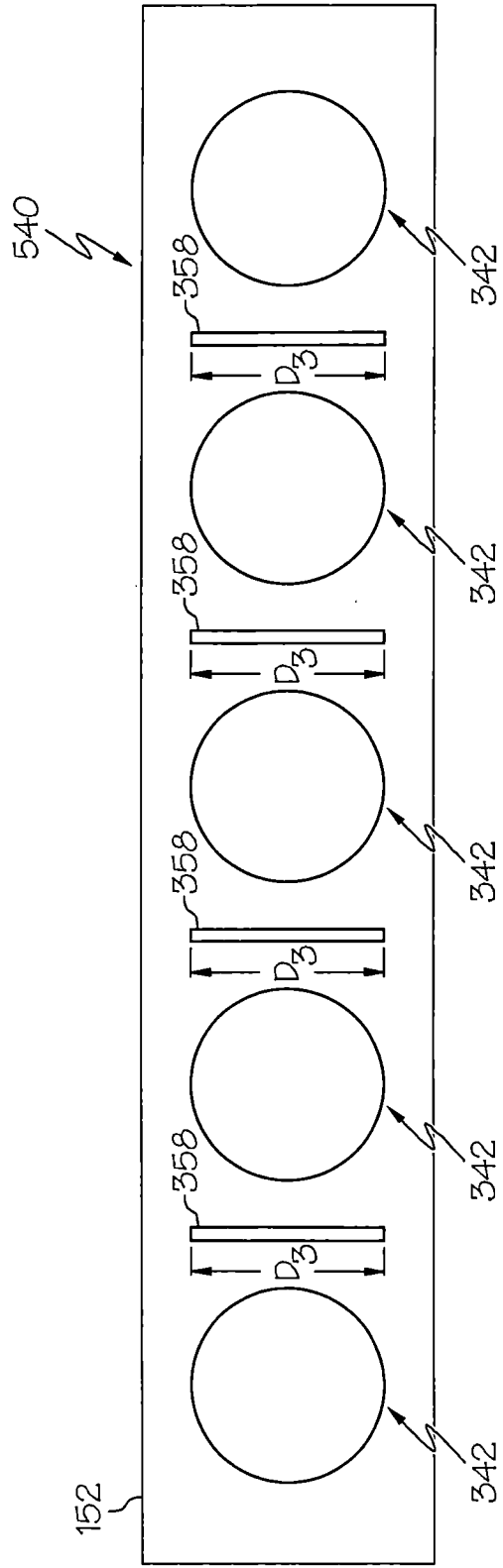
第5圖



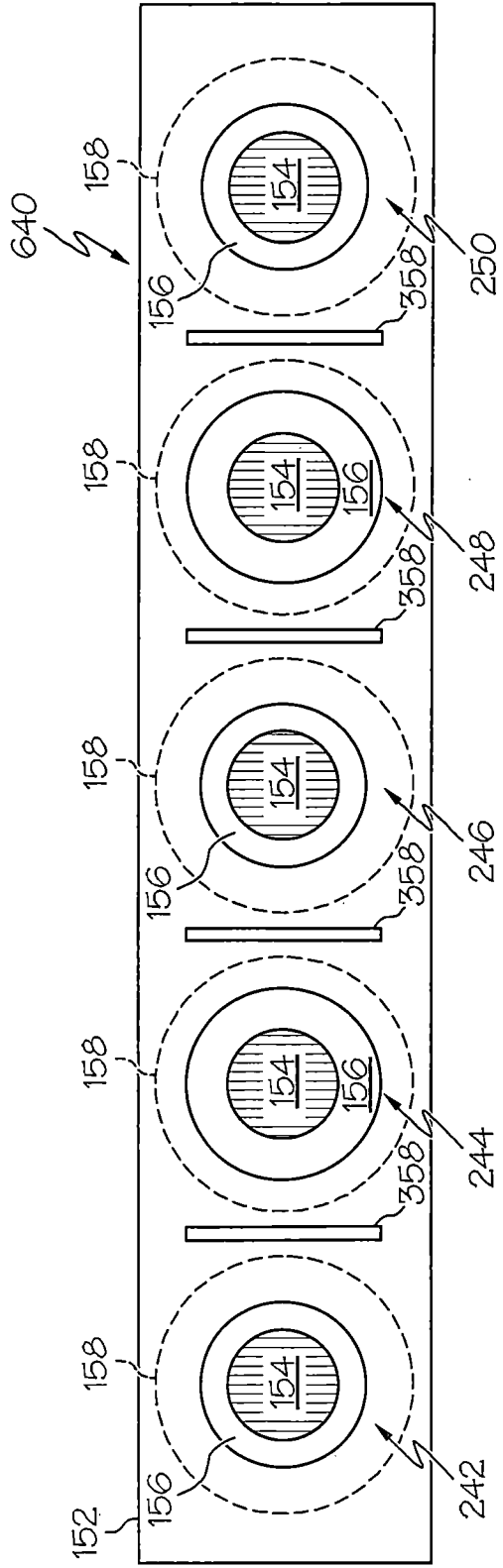
第6A圖



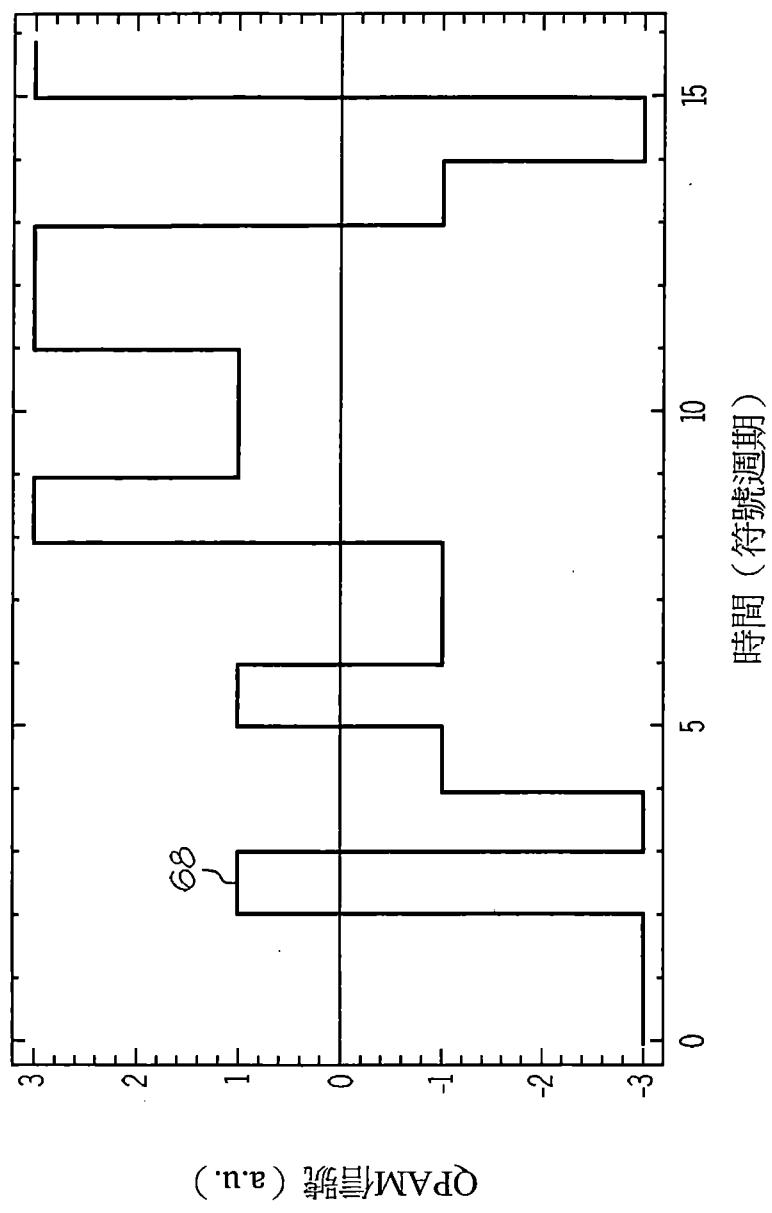
第6B圖



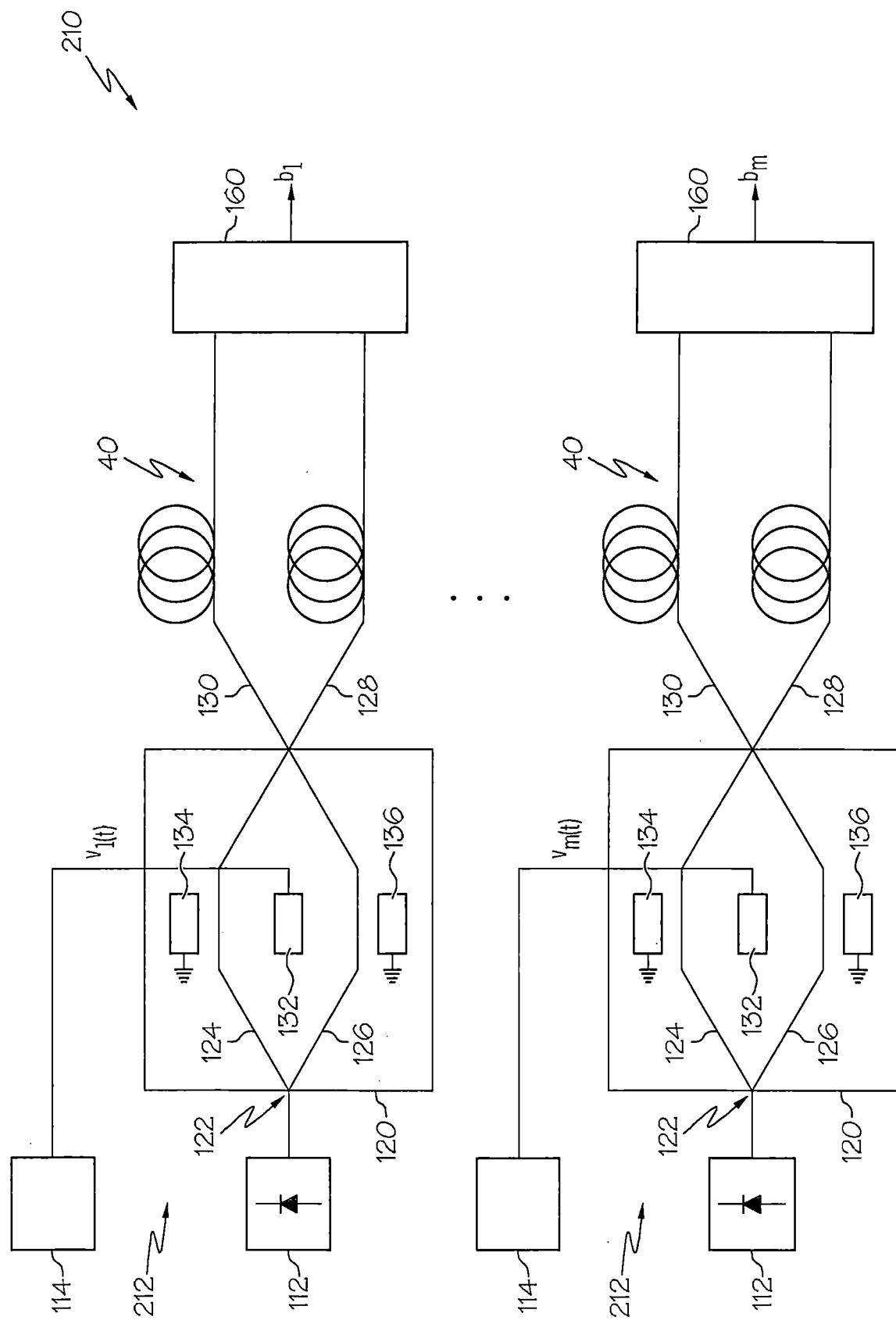
第6C圖



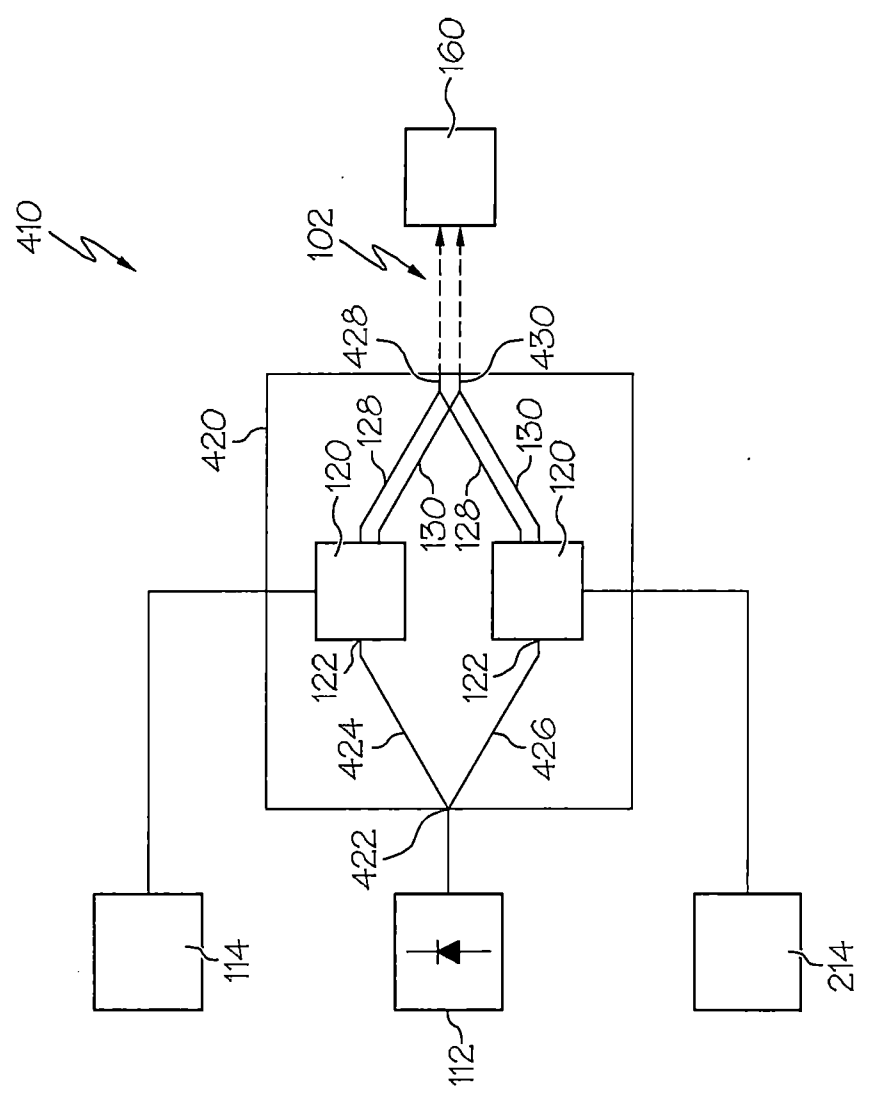
第7圖



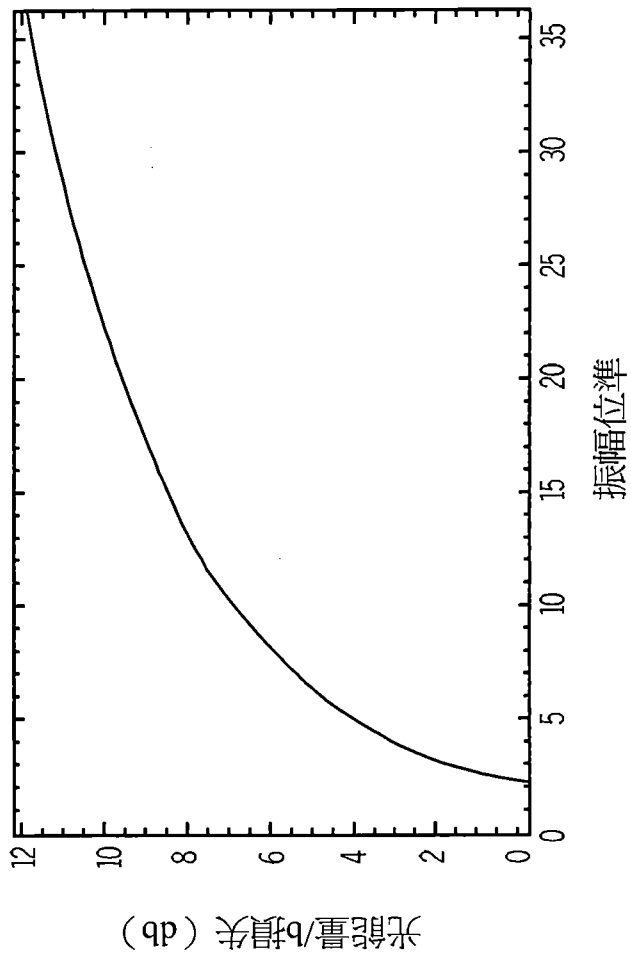
第8圖



第9圖



第11圖



第12圖