



(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 I767877 B

(45)公告日：中華民國 111 (2022) 年 06 月 11 日

(21)申請案號：111105772

(22)申請日：中華民國 109 (2020) 年 12 月 04 日

(51)Int. Cl. : G06N3/06 (2006.01)

(30)優先權：2019/12/04	美國	62/943,756
2020/04/29	美國	63/017,211
2020/07/06	美國	63/048,439
2020/08/06	美國	63/061,995

(71)申請人：新加坡商光子智能私人有限公司(新加坡) LIGHTELLIGENCE, PTE. LTD. (SG)  
新加坡(72)發明人：侯善札達 艾瑞許 HOSSEINZADEH, ARASH (IR)；徐葉龍 XU, YELONG (CN)；  
柏豔飛 BAI, YANFEI (CN)；孟懷宇 MENG, HUAIYU (CN)；蓋格能 羅納德  
GAGNON, RONALD (US)；盧正觀 LU, CHENG-KUAN (TW)；泰瑞 強納森  
TERRY, JONATHAN (US)；鄧 京東 DENG, JINGDONG (US)；史丹曼 莫瑞  
斯 STEINMAN, MAURICE (US)；沈亦晨 SHEN, YICHEN (CN)

(74)代理人：洪澄文；洪茂

(56)參考文獻：

US 5220643	US 6307854B1
US 2004/223768A1	US 2017/0351293A1
US 2019/0318234A1	

審查人員：劉耀允

申請專利範圍項數：30 項 圖式數：47 共 203 頁

(54)名稱

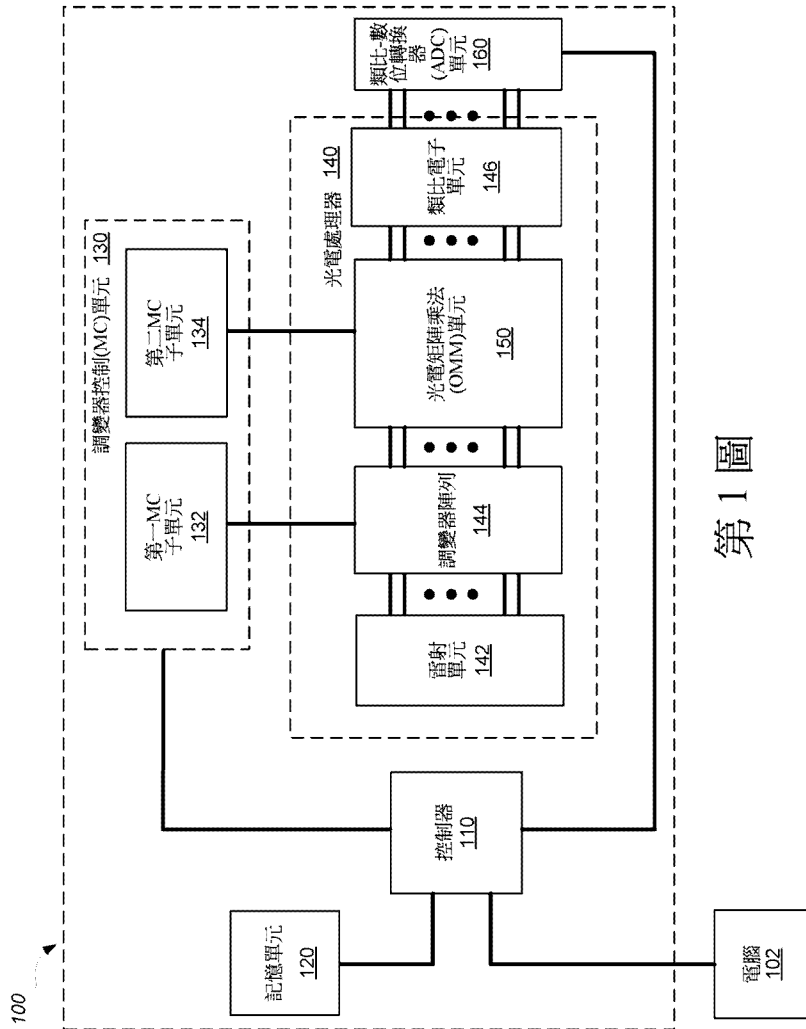
光電處理系統

(57)摘要

一光電處理系統，包括至少一輸入光波導，被配置以接收一光波、至少一數位輸入埠，被配置以接收一系列數位輸入值，每一數位輸入值包括二個或更多位元、及一光學調變器，耦接至該輸入光波導。該光學調變器包括光波導部分，該光波導部分包括多個光波導片段，關聯於沿該光波導片段佈設的二極體區段，其中該等二極體區段被配置以施加不同的個別調變貢獻至經由該光波導部分傳播的一光波。

An optoelectronic processing system including at least one input optical waveguide configured to receive an optical wave, at least one digital input port configured to receive a series of digital input values, each digital input value including two or more bits, and an optical modulator coupled to the input optical waveguide. The optical modulator includes an optical waveguide portion that includes multiple optical waveguide segments associated with diode sections positioned along the optical waveguide segments, in which the diode sections are configured to apply different respective modulation contributions to an optical wave propagating through the optical waveguide portion.

指定代表圖：



第 1 圖

符號簡單說明：

100: 人工神經網路

(ANN)運算系統

102: 電腦

110: 控制器

120: 記憶單元

130: 調變器控制單元

132: 第一調變器控制  
(MC)子單元

134: 第二調變器控制

(MC)子單元(第二數位-類比轉換器(DAC)

子單元)

140: 光電處理器

142: 雷射單元

144: 調變器陣列

146: 類比電子單元

150: 光電矩陣乘法

(OMM)單元

160: 類比-數位轉換器

(ADC)單元



I767877

## 【發明摘要】

【中文發明名稱】 光電處理系統

【英文發明名稱】 OPTOELECTRONIC PROCESSING

SYSTEM

## 【中文】

一光電處理系統，包括至少一輸入光波導，被配置以接收一光波、至少一數位輸入埠，被配置以接收一系列數位輸入值，每一數位輸入值包括二個或更多位元、及一光學調變器，耦接至該輸入光波導。該光學調變器包括光波導部分，該光波導部分包括多個光波導片段，關聯於沿該光波導片段佈設的二極體區段，其中該等二極體區段被配置以施加不同的個別調變貢獻至經由該光波導部分傳播的一光波。

## 【英文】

An optoelectronic processing system including at least one input optical waveguide configured to receive an optical wave, at least one digital input port configured to receive a series of digital input values, each digital input value including two or more bits, and an optical modulator coupled to the input optical waveguide. The optical modulator includes an optical waveguide portion that includes multiple optical waveguide segments associated with diode sections positioned along the optical waveguide segments, in which the diode sections are configured to apply different respective modulation contributions to an optical wave propagating through the optical

waveguide portion.

【指定代表圖】 第1圖

【代表圖之符號簡單說明】

100: 人工神經網路(ANN)運算系統

102: 電腦

110: 控制器

120: 記憶單元

130: 調變器控制單元

132: 第一調變器控制(MC)子單元

134: 第二調變器控制(MC)子單元(第二數位-類比轉換器(DAC)子單元)

140: 光電處理器

142: 雷射單元

144: 調變器陣列

146: 類比電子單元

150: 光電矩陣乘法(OMM)單元

160: 類比-數位轉換器(ADC)單元

【特徵化學式】 無

## 【發明說明書】

【中文發明名稱】 光電處理系統

【英文發明名稱】 OPTOELECTRONIC PROCESSING  
SYSTEM

### 【技術領域】

【0001】 本揭露係關於光電處理之光學調變技術。

### 【先前技術】

【0002】 仿神經形態運算(neuromorphic computing)是一種在電子領域模仿人腦運作的方式。一種著名的神經形態運算方式是人工神經網路(artificial neural network, ANN)，其為多個人工神經元(artificial neurons)之集合，該等人工神經元以特定方式相互連接，以類似人腦作用的方式處理訊息。ANN已在許多應用領域獲得廣泛運用，包括人工智能(artificial intelligence)、語音辨識(speech recognition)、文字辨識(text recognition)、自然語言處理(natural language processing)及各種不同形式的組型辨識(pattern recognition)。

【0003】 一個ANN具有一個輸入層、一個或多個隱藏層(hidden layer)及一個輸出層。每一層皆具有節點(nodes)或人工神經元，且該等節點在各層間相互連接。隱藏層中的每一節點對接收自上一層之節點的訊號進行加權和(weighted sum)計算，並對該

加權和進行非線性轉換(或稱「啟用」(activation))以產生一輸出。該加權和可經由矩陣乘法步驟算出。因此，計算ANN一般包括多個矩陣乘法步驟，此等步驟一般使用電子積體電路進行。

**【0004】** 對以類比或數位形式電訊號(例如電壓或電流)編碼的電子資料進行的計算，一般使用電子運算硬體實施，例如以積體電路實施的類比或數位電子元件(例如處理器、特定應用積體電路(application-specific integrated circuit, ASIC)或系統單晶片(system on a chip, SoC))、電子電路板，或其他電子電路。光學訊號被用於遠距離或較近距離(例如在資料中心內)傳輸資料。對此等光學訊號進行之操作，通常發生於光學資料傳輸之情形中，例如在用於切換或過濾網路中的光學訊號的裝置內。光學訊號在運算平台上的使用相對有限。習知技術中已提出各種供全光學運算使用的部件與系統。例如，該等系統可包括分別在輸入端自電子訊號轉換至光學訊號，以及在輸出端自光學訊號轉換至電子訊號，但並非在運算中進行的重要操作中同時使用兩種訊號(電子與光學)。

#### **【發明內容】**

**【0005】** 一般而言，就一方面而言，一個系統包括至少一個光波導(optical waveguide)，被配置以接收光波；至少一個數位輸入埠，被配置以在連續時間間隔內接收一系列數位輸入值；以及一個光學調變器(optical modulator)，耦接至該光波導。該光學調變器包括光波導部分，該光波導部分包括多個沿著該光波導部分分

佈的二極體區段。該等二極體區段分別對通過該光波導部分傳播的光波進行不同程度的調變，且其中每一個二極體區段分別包括一個光徑長(optical path length)小於約1公釐的半導體二極體，以及多個電接點，以在順向偏壓狀態下外加(施加)一電訊號至該半導體二極體，在該順向偏壓狀態中該二極體區段的光學特性被調變，以回應該數位輸入值中一個對應位元的值。該光學調變器包括訊號調節(signal conditioning)電路，被配置以依據一系列數位輸入值中連續的數位輸入值之間對應的改變，形塑(shape)外加至至少一個該等半導體二極體的電訊號的振幅改變。

**【0006】** 上述面向可包括一個或多個下列特徵。依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值，形塑外加至該等半導體二極體的電訊號的振幅改變之動作可包括：對於第二時間間隔的起始部分，增大對應第一時間間隔的第一電訊號位準與對應第二時間間隔的第二電訊號位準之間的振幅改變量。

**【0007】** 依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值，形塑外加至該等半導體二極體的電訊號的振幅改變之動作可更包括：對於第二時間間隔的最終部分，減少第一電訊號位準與第二電訊號位準之間的振幅改變量。

**【0008】** 依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值，形塑外加至該等半導體二極體的電訊號的振幅改變之動作可包括：經由匹配電路外加一電訊號至該半導體二極體，該匹配電路被配置以匹配該半導體二極體之阻抗，而不明顯改變該外加電訊號之振幅。

【0009】 該匹配電路可包括被動電路。

【0010】 該匹配電路可基本上由電感組成。

【0011】 依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值，形塑外加至該等半導體二極體的電訊號的振幅改變之動作可包括：經由一電路外加一電訊號至該半導體二極體，該電路被配置以在該半導體二極體與串聯於該半導體二極體及提供該一系列數位輸入值的電路之間的電容之間產生幫浦電流(pump current)，在該電路中該被抽送電流傳輸的電荷量，至少某種程度上取決於一個在提供該一系列數位輸入值的多個時間間隔中保持恆定的電壓。

【0012】 該光學調變器可包括干涉儀光學調變器(interferometric optical modulator)，該干涉儀光學調變器更包括光學干涉部分，被配置以基於該等二極體區段累積的調變量，提供某種程度的光學相消干涉，造成一預先定義的振幅減低現象。

【0013】 該光學干涉部分可包括光學結合器(optical combiner)。

【0014】 該光波導部分可包括：至少二個光波導片段，每一光波導片段各接收一個從同一分光器(optical splitter)分出的光波分支，該分光器耦接至該輸入光波導，並提供一光波至該光學結合器。

【0015】 該二極體區段的光學特性可包括該二極體區段的有效折射率，且各二極體區段不同的調變量可包括各不同的相位偏移。

【0016】 一個第一二極體區段的第一半導體二極體的光徑



長，可約為一個第二二極體區段的第二半導體二極體的光徑長的兩倍。

**【0017】** 依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值，形塑外加至該等半導體二極體的電訊號的振幅改變之動作可包括：外加一個預先定義的電訊號振幅的第一形態至該第一二極體區段的電接點及該第二二極體區段的電接點以回應一個對應位元由0至1的數值改變，以及外加一個預先定義的電訊號振幅的第二形態至該第一二極體區段的電接點及該第二二極體區段的電接點以回應一個對應位元由1至0的數值改變。

**【0018】** 依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值，形塑外加至該等半導體二極體的電訊號的振幅改變之動作可包括：經由一個第一匹配電路外加一電訊號至該第一二極體區段的電接點，該第一匹配電路被配置以匹配該第一半導體二極體的阻抗，以及經由一個第二匹配電路外加一電訊號至該第二二極體區段的電接點，該第二匹配電路被配置以匹配該第二半導體二極體的阻抗。

**【0019】** 該第一匹配電路及該第二匹配電路可基本上由電感組成。

**【0020】** 該輸入光波導可耦接至一光學解多工器(optical demultiplexer)，該光學解多工器分離至少二個不同波長的光波。

**【0021】** 該光學調變器可包括吸收光學調變器(absorption optical modulator)，被配置以基於該等二極體區段累積的調變量，提供某種程度的吸光度(absorbance)，造成一預先定義的振幅

減低現象。

【0022】 該二極體區段的光學特性可包括該二極體區段的吸光度係數，且各二極體區段不同的調變量可包括各不同的吸光度。

【0023】 該至少一個輸入光波導可包括多個輸入光波導，多個光學調變器可一一與該等多個輸入光波導中不同輸入光波導耦接，且該等光學調變器的輸出可合併，以提供一向量矩陣乘法結果。

【0024】 就另一方面而言，一個系統包括：至少一個輸入光波導，被配置以接收一光波；至少一個數位輸入埠，被配置以在連續時間間隔中接收一系列數位輸入值；以及一個干涉儀光學調變器，耦接至該輸入光波導。該干涉儀光學調變器包括一個光波導部分，該光波導部分包括一個沿著該光波導部分分佈的二極體區段。該二極體區段對通過該光波導部分傳播的光波進行調變，且該二極體區段包括：一個光徑長小於約1公釐的半導體二極體，以及多個電接點，以在順向偏壓狀態下外加一電訊號至該半導體二極體，在該順向偏壓狀態中該二極體區段的光學特性被調變，以回應該數位輸入值。該干涉儀光學調變器包括訊號調節電路，被配置以依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值的對應改變，形塑外加至該半導體二極體的電訊號的振幅改變。該訊號調節電路包括：一個第一訊號調節路徑，提供一個未調節的電訊號，對應於該一系列數位輸入值，一個第二訊號調節路徑，提供該未調節電訊號的一個延遲、縮放和／或反相訊號，以及一個第三訊號調節路徑，提供該未調節電訊號的一個延遲、縮放和／或反相訊號。該干涉儀光學調變器更

包括一個光學干涉部分，被配置以基於該二極體區段光學特性的調變量，提供某種程度的光學相消干涉，造成一預先定義的振幅減低現象。

**【0025】** 上述面向可包括一個或多個下列特徵。該光學干涉部分可包括一對光波導中每一光波導的耦接部分，該等每一光波導的耦接部分彼此接近。

**【0026】** 該光波導部分可包括該對光波導中一個形成於一封閉路徑中之第一光波導。

**【0027】** 就另一方面而言，一個系統包括至少一個輸入光波導，被配置以接收一光波；至少一個數位輸入埠，被配置以接收一系列數位輸入值，其中每一數位輸入值包括二個或更多位元；以及一個光學調變器，耦接於該輸入光波導，該光學調變器包括一個光波導部分，該光波導部分包括多個沿著該光波導部分分佈的二極體區段，其中該等二極體區段被配置以分別對通過該光波導部分傳播的光波進行不同程度的調變。

**【0028】** 上述面向可包括一個或多個下列特徵。該光學調變器可包括訊號調節電路，被配置以依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值的對應改變，形塑外加至至少一個該等二極體區段的電訊號的振幅改變。

**【0029】** 每一個二極體區段可包括：一個半導體二極體，以及多個電接點，以在順向偏壓狀態下外加一電訊號至該半導體二極體，在該順向偏壓狀態中該二極體區段的光學特性被調變，以回應

該數位輸入值中一個對應位元的值。

**【0030】** 每一半導體二極體可具有小於約1公釐之光徑長。

**【0031】** 就另一方面而言，一個系統包括：至少一個輸入光波導，被配置以接收一光波；至少一個數位輸入埠，被配置以接收一系列數位輸入值，其中每一數位輸入值包括二個或更多位元；以及一個干涉儀光學調變器，耦接至該等至少一個輸入光波導。該干涉儀光學調變器包括一個光波導部分，該光波導部分包括一個沿著該光波導部分分佈的二極體區段，其中該二極體區段被配置以對通過該光波導部分傳播的光波進行調變。該干涉儀光學調變器包括訊號調節電路，被配置以依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值的對應改變，形塑外加至該二極體區段的電訊號的振幅改變。該訊號調節電路包括：一個第一訊號調節路徑，提供一個未調節的電訊號，對應於該一系列數位輸入值，一個第二訊號調節路徑，提供該未調節電訊號的一個延遲、縮放和／或反相訊號，以及一個第三訊號調節路徑，提供該未調節電訊號的一個延遲、縮放和／或反相訊號。

**【0032】** 上述面向可包括一個或多個下列特徵。該二極體區段可包括一個光徑長小於約1公釐的半導體二極體。

**【0033】** 該干涉儀光學調變器可包括一個光學干涉部分，被配置以基於該二極體區段光學特性的調變量，提供某種程度的光學相消干涉，造成一預先定義的振幅減低現象。

**【0034】** 該二極體區段可包括：一個半導體二極體，以及多

個電接點，以在順向偏壓狀態下外加一電訊號至該半導體二極體，在該順向偏壓狀態中該二極體區段的光學特性被調變，以回應該數位輸入值。

**【0035】** 該半導體二極體可具有小於約1公釐之光徑長。

**【0036】** 就另一方面而言，一個系統包括一個光學調變器，被配置以調變一個代表一系列數位輸入值的光波，其中每一數位輸入值包括二個或更多位元。該光學調變器包括一個光波導部分，該光波導部分包括多個沿著該光波導部分分佈的二極體區段。該等二極體區段被配置以分別對通過該光波導部分傳播的光波進行不同程度的調變。每一二極體區段包括一個半導體二極體，被配置以在順向偏壓狀態下運作，在該順向偏壓狀態中該二極體區段的光學特性被調變，以回應該數位輸入值的一個對應位元值。該光學調變器包括訊號調節電路，被配置以依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值的對應改變，形塑外加至至少一個該等二極體區段的電訊號的振幅改變。

**【0037】** 上述面向可包括下列特徵。每一半導體二極體可具有小於約1公釐之光徑長。

**【0038】** 就另一方面而言，一個系統包括：一個第一單元，被配置以產生一個調變器控制訊號之第一集合，一個第二單元，被配置以產生一個調變器控制訊號之第二集合，以及一個處理器單元。該處理器單元包括一個光源或光埠，被配置以提供多個光輸出，以及一個由多個光學調變器組成的第一集合，耦接至該光源或光埠

及該第一單元。該等第一集合之光學調變器被配置以基於對應該等第一集合調變器控制訊號的數位輸入值，調變該等由該光源或光埠提供的光輸出，以產生一光學輸入向量，其中該光學輸入向量包括多個光學訊號。該處理器單元亦包括一個矩陣乘法單元，該矩陣乘法單元包括一個由多個光學調變器組成的第二集合。該矩陣乘法單元耦接至該第二單元，被配置以基於對應該等第二集合調變器控制訊號的多個數位加權值，將該光學輸入向量轉換為一類比輸出向量。該等第一集合光學調變器中至少一個光學調變器包括一個第一光波導部分，該第一光波導部分包括多個沿著該第一光波導部分分佈的二極體區段。該等二極體區段被配置以基於其中一個該等數位輸入值中的不同個別單一位元，分別對通過該第一光波導部分傳播的光波進行不同程度的調變。該等第二集合光學調變器中至少一個光學調變器包括一個第二光波導部分，該第二光波導部分包括單一二極體區段，被配置以基於其中一個該等數位加權值的多個位元，對通過該第二光波導部分傳播的光波進行調變。

**【0039】** 上述面向可包括下列特徵。每一個別二極體區段包括一個半導體二極體，被配置以在順向偏壓狀態下運作，在該順向偏壓狀態中該二極體區段的光學特性被調變，以回應該等數位輸入值的一個對應位元值。

**【0040】** 就另一方面而言，一個系統包括：至少一個輸入光波導，被配置以接收一光波；至少一個數位輸入埠，被配置以在連續時間間隔中接收一系列數位輸入值，其中每一數位輸入值包括二

個或更多位元；以及一個光學調變器，耦接至該輸入光波導。該光學調變器包括：一個光波導部分，該光波導部分包括多個光波導片段，與沿著對應的光波導片段分佈的多個二極體區段關聯，該等光波導片段為一個連續光波導的一部分，在該連續光波導中該等二極體區段被配置以分別對通過該等光波導片段傳播的光波進行不同程度的調變。每一個別二極體區段包括：一個光徑長小於約1公釐的半導體二極體，以及多個電接點，以在順向偏壓狀態下外加一電訊號至該半導體二極體，在該順向偏壓狀態中與該二極體區段關聯的光波導片段的光學特性被調變，以回應該數位輸入值的一個對應位元，以及訊號調節電路，被配置以依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值的對應改變，形塑外加至至少一個該等二極體的電訊號的振幅改變。

【0041】就另一方面而言，一個系統包括：至少一個輸入光波導，被配置以接收一光波；至少一個輸入埠，被配置以接收一系列調變器控制訊號；以及一個光學調變器，耦接至該輸入光波導，被配置以提供四個以上振幅等級的脈衝振幅調變。該光學調變器包括一個第一調變器臂(modulator arm)及一個第二調變器臂，該第一調變器臂及該第二調變器臂中至少一個調變器臂包括一個光波導及多個沿著該光波導分佈的移相器(phase shifters)，該等移相器被配置以分別對通過該光波導傳播的光波進行不同程度的調變，其中每一移相器各耦接至一個被配置以提供二元調變(binary modulation)增加之頻寬的訊號控制電路，且不同移相器耦接至不

同訊號控制電路。每一移相器包括一個半導體二極體或一個電容，其光徑長小於約1公釐。該系統包括控制電路，被配置以對每一移相器進行至少以下之一：(i) 提供一電訊號至該半導體二極體，以造成該半導體二極體處於順向偏壓狀態，在該順向偏壓狀態中與該移相器關聯的光波導的光學特性被調變，以回應該調變器控制訊號，或(ii) 提供一電訊號至該電容，以造成電荷累積於該電容中，此時與該移相器關聯的光波導的光學特性被調變，以回應該調變器控制訊號。

**【0042】** 就另一方面而言，一個系統包括：一個光學調變器，被配置以調變一個代表一系列數位輸入值的光波，其中每一數位輸入值包括二個或更多位元，該光學調變器包括一個光波導部分，該光波導部分包括多個沿著該光波導部分分佈的二極體區段，其中該等二極體區段被配置以分別對通過該光波導部分傳播的該光波進行不同程度的調變。每一二極體區段包括一個半導體二極體，被配置以在順向偏壓狀態下運作，在該順向偏壓狀態中該二極體區段的光學特性被調變，以回應該數位輸入值的一個對應位元值。該光學調變器包括多個訊號調節電路，被配置以依據該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值的對應改變，形塑外加至每一該等二極體的電訊號的振幅改變，其中每一訊號調節電路皆與其中一個該等二極體區段關聯，且不同二極體區段與不同訊號調節電路關聯。

**【0043】** 就另一方面而言，一個系統包括：一個由多個光學調變器組成的第一集合，被配置以基於調變器控制訊號調變多個輸



入光訊號，產生一個光學輸入向量，該光學輸入向量包括多個光學訊號；以及一個矩陣處理單元，包括一個由多個光學調變器組成的第二集合，該矩陣處理單元耦接至該調變器陣列，被配置以基於多個加權值，將該光學輸入向量轉換為一個類比輸出向量。該等第一集合光學調變器中至少一個光學調變器包括一個第一調變器臂及一個第二調變器臂，該第一調變器臂及該第二調變器臂中至少一個調變器臂包括一個光波導及至少二個沿著該光波導分佈的移相器，其中每一移相器被配置以基於該等調變控制訊號之一對通過該光波導傳播的光波進行調變，不同移相器被配置以對通過該光波導傳播的該光波進行不同程度的調變，以回應相同的調變控制訊號位準。該等第二集合光學調變器中至少一個光學調變器包括一個第一調變器臂及一個第二調變器臂，該第一調變器臂及該第二調變器臂中各包括一個光波導，該第一調變器臂及該第二調變器臂中至少一個調變器臂包括單一沿著該光波導分佈的移相器，該第一調變器臂及該第二調變器臂中各包括至多一個移相器。

**【0044】** 就另一方面而言，一個系統包括：一個第一單元，被配置以產生多個調變器控制訊號；以及一個處理器單元。該處理器單元包括：一個光源，被配置以提供多個光輸出、一個調變器陣列、以及一個矩陣處理單元。該調變器陣列包括一個由多個光學調變器組成的第一集合，耦接至該光源及該第一單元，該等光學調變器被配置以基於該等調變器控制訊號，調變該光源提供的多個光輸出，以產生一個光輸入向量，該光輸入向量包括多個光訊號，其中

每一個該等光學調變器皆具有片段式設計並包括二個或更多移相器，且每一該等移相器皆與一個訊號調節電路關聯，該訊號調節電路被配置以對該移相器實施預加重(**pre-emphasis**)及去加重(**de-emphasis**)，以增加該移相器之運作頻寬。該矩陣處理單元耦接至該調變器陣列及該第一單元，該矩陣處理單元被配置以基於多個加權控制訊號，將該光學輸入向量轉換為一個類比輸出向量，其中該矩陣處理單元包括一個由多個具有非片段式設計的光學調變器組成的第二集合，其中每一光學調變器在至少一個調變器臂中具有單一移相器，每一調變器臂中具有至多一個移相器。該系統包括一個第二單元，耦接至該矩陣乘法單元，該第二單元被配置以將該類比輸出向量轉換為一個數位化輸出向量；以及一個控制器，包括積體電路，被配置以進行下列運作：接收一個人工神經網路運算請求，包括一個包含第一數位輸入向量的輸入資料集(**dataset**)；接收第一群組的多個神經網路加權值；並經由該第一單元，基於該第一數位輸入向量產生第一群組的多個調變器控制訊號，以及基於該等第一群組的神經網路加權值產生第一群組的多個加權控制訊號。

**【0045】** 上述面向可包括一個或多個下列優點。

**【0046】** 在本說明書描述的某些實施例中，用以進行光學調變的部件種類，及／或該等部件的特徵，乃為提供由其構成的光電運算系統效能上的改善或其他設計上的優點而選取。在一個使用矽光子學(**silicon photonics**)技術製造的系統中，光波導可由矽構成，且有多種半導體二極體結構可由在鄰近該波導處對矽摻入雜質

構成，以便調變在該波導中傳播的光波。例如，可設計PIN二極體結構或金屬-氧化物-半導體(MOS)電容，使用不同的摻雜分布(doping profiles)達成載子注入(carrier injection)、載子空乏(carrier depletion)或載子累積(carrier accumulation)，以便進行基於自由載子的調變(free-carrier-based modulation)。載子注入使用順向偏壓的PIN二極體結構，由於其調變效率高，故一般具有相對較小的體積(例如小於1公釐)，然而其調變速度較慢(例如小於約1Gb/秒)，而載子空乏使用逆向偏壓的PIN二極體結構，一般具有較大的體積(例如大於1公釐)但調變速度較快(例如大於約1Gb/秒)。在某些範例中，載子累積使用一電容以儲存電荷，其中該電容包括一個薄垂直絕緣層。該薄垂直絕緣層在某些半導體製程中可能難以製造。因此，對某些半導體製程而言，上述用以實施載子注入的順向偏壓PIN二極體結構可能較為容易製造。

**【0047】** 載子注入技術同時提供小體積與低功率之特徵，在具有稠密調變器陣列的大規模光電運算系統中十分有用。對多位元調變(例如脈衝振幅調變(pulse-amplitude modulation, PAM))使用片段式調變器設計，並使用載子注入PIN二極體結構，如以下詳述，可使用頻寬增加技術，以簡單、小巧而適合該系統中稠密排列的調變器的設計，克服頻寬限制(例如增加頻寬約10倍)。由於因上述技術增加的頻寬並不必達到載子空乏或載子累積調變器所能達到的頻寬大小，故由該片段式調變器導致的單純頻寬增加、與載子注入調變器的小巧體積，兩者一同提供多個有用的優點，可供本說

明書描述的某些系統實施例使用。某些形式的頻寬增加，例如預加重，可能在有多於二個振幅等級時難以實施。然而，若有片段式調變器，則個別的二元預加重可實施於多位元調變中每一位元的二個振幅等級上，如下文所述。

**【0048】** 此外，由於使用該等已調變光學訊號進行的該等運算之故，該等運算結果的類比振幅等級在轉換為數位訊號時被取樣的數量(例如使用PAM-256調變的8位元訊號)可能大於該等運算輸入值的等級數量(例如使用PAM-16調變的4位元訊號)。例如，一個4位元數值與另一4位元數值相乘可得一個適合以8位元表示的數值。因此，由於在該等輸入訊號被該光電運算系統處理後，解析度必須增加，故需要高效的類比至數位轉換，因而使用頻寬增加技術以提升訊號雜訊比(signal to noise ratio)。

**【0049】** 除非另有定義，否則本說明書中使用的所有技術與科學詞彙，皆具有與本發明所屬領域具通常技術者普遍知悉之定義相同。若本說明書之內容與併入參照之專利申請文件或專利申請公開文件有衝突之處，則以本說明書之內容及定義為準。

**【0050】** 本說明書描述標的之一個或多個實施例，將於附隨之圖式及下文中詳述。根據本文敘述、圖式及請求項，本發明之其他特徵、面向及優點，乃明白易懂。

#### **【圖式簡單說明】**

**【0051】** 本揭露於閱讀下文實施方式，並搭配附隨之圖式一

併閱讀後，可達最佳之理解。在此強調，根據本發明所屬領域之慣常作法，圖式中各特徵並未依比例繪製。反之，該等特徵之大小可為清晰起見而任意放大或縮小。

【0052】 第1圖為一示意圖，圖示一人工神經網路(ANN)運算系統之範例。

【0053】 第2圖為一示意圖，圖示一Mach-Zehnder干涉儀(MZI)之範例。

【0054】 第3圖為一示意圖，圖示一電荷幫浦(charge pump)頻寬增加電路之範例。

【0055】 第4圖為一流程圖，圖示一個進行ANN運算的方法之範例。

【0056】 第5圖圖示第4圖所示方法之一面向。

【0057】 第6圖為一示意圖，圖示一波長分波多工(wavelength division multiplexed)ANN運算系統。

【0058】 第7圖圖示一Mach-Zehnder調變器之範例。

【0059】 第8圖圖示一使用片段設計之Mach-Zehnder調變器之範例。

【0060】 第9圖圖示第8圖之Mach-Zehnder調變器及對應之驅動電路。

【0061】 第10圖至第16圖圖示Mach-Zehnder調變器之範例。

【0062】 第17圖為一時序圖，圖示第3圖之電荷幫浦頻寬增加

電路之特性。

【0063】 第18圖為一圖表，圖示第7圖之Mach-Zehnder調變器之強度-電壓曲線。

【0064】 第19圖為一示意圖，圖示一光電運算系統之範例。

【0065】 第20圖及第21圖為示意圖，圖示系統設置之範例。

【0066】 第22圖為一示意圖，圖示一對稱差分(symmetric differential)設置之範例。

【0067】 第23圖及第24圖為電路圖，圖示系統模組之範例。

【0068】 第25圖為一示意圖，圖示一對稱差分設置之範例。

【0069】 第26圖為一示意圖，圖示一系統設置之範例。

【0070】 第27圖為一示意圖，圖示一光學振幅調變器之範例。

【0071】 第28圖至第30圖為示意圖，圖示使用對稱差分設置且具有光感測(偵測)器的光學振幅調變器之範例。

【0072】 第31圖至第33圖為光電電路圖，圖示系統設置之範例。

【0073】 第34圖至第38圖為示意圖，圖示使用多個光電子系統的運算系統之範例。

【0074】 第39圖為一示意圖，圖示一個使用光電處理器的波長分波多工ANN運算系統之範例。

【0075】 第40圖及第41圖為示意圖，圖示波長分波多工光電矩陣乘法單元之範例。

【0076】 第42圖為一示意圖，圖示一同差偵測器(homodyne

detector)。

【0077】 第43圖為一示意圖，圖示一運算系統，該運算系統包括光纖，每一光纖皆攜帶具有多個波長的訊號。

【0078】 第44圖為一示意圖，圖示一光學矩陣乘法單元之範例。

【0079】 第45圖及第46圖為示意圖，圖示互連MZI設置之範例。

【0080】 第47圖為一示意圖，圖示一個包括校正移相器之片段式MZI調變器。

【0081】 第48圖為一示意圖，圖示第47圖之片段式MZI調變器及相關驅動電路。

【0082】 第49圖為一示意圖，圖示一個包括校正移相器之片段式MZI調變器。

【0083】 第50圖圖示一個具有片段式設計的光學調變器的調變器陣列之範例。

【0084】 第51圖為一示意圖，圖示一ANN運算系統之範例。

【0085】 第52圖為一示意圖，圖示一波長分波多工光電矩陣乘法單元之範例。

【0086】 第53圖為一流程圖，圖示一個進行ANN運算的方法之範例。

【0087】 第54圖圖示一個具有片段式設計的環形諧振器 (ring resonator) 調變器之範例。

【0088】 不同圖式中相同的參考編號及名稱指涉相同元件。

【實施方式】

【0089】 第1圖為一示意圖，圖示一範例人工神經網路(ANN)運算系統100。該系統100包括控制器110、記憶單元120、調變器控制(modulator control, MC)單元130、光電處理器140、及類比-數位轉換器(analog-to-digital converter, ADC)單元160。該控制器110耦接至一電腦102、該記憶單元120、該MC單元130、及該ADC單元160。該控制器110包括積體電路，該積體電路被配置以控制該ANN運算系統100之運作，以進行ANN運算。

【0090】 該控制器110的積體電路可為特定應用積體電路(application specific integrated circuit)，專為進行ANN運算程序之各步驟而配置。例如，該積體電路可實施專為進行該ANN運算程序而配置的微碼(microcode)或韌體(firmware)。因此，該控制器110可具有比傳統電腦(例如該電腦102)中使用的通用處理器更小的指令集(set of instructions)。在某些實施中，該控制器110的積體電路可包括二個或更多電路，被配置以進行該ANN運算程序中的不同步驟。

【0091】 在該ANN運算系統100的一個範例運作中，該電腦102可發出一個人工神經網路運算請求至該ANN運算系統100。該ANN運算請求可包括定義一個ANN的神經網路加權值，以及一個將由該給定ANN處理的輸入資料集(dataset)。該控制器110接收該



ANN運算請求，並儲存該輸入資料集與該神經網路加權值在該記憶單元120中。

【0092】 該輸入資料集可對應多種將由該ANN處理的數位資訊。該輸入資料集的範例包括影像檔案、音訊檔案、光學雷達(light detection and ranging, LiDAR)點雲(point cloud)、生物資料檔案、以及全球定位系統(Global Positioning System, GPS)座標序列。於下文中，該ANN運算系統100的運作將以接收影像檔案作為該輸入資料集的形式描述。一般而言，該輸入資料集的大小差異很大，從數百個資料點到數百萬或更多個資料點不等。例如，一個解析度為1百萬畫素的數位影像檔案具有約1百萬個畫素(pixels)，而該等1百萬個畫素中的每一個畫素皆可作為將由該ANN處理的一個資料點。由於在一個典型的輸入資料集中的資料點數量相當大，故該輸入資料集通常被分割為多個較小的數位輸入向量，各數位輸入向量個別被該光電處理器140處理。例如，對一個灰階數位影像而言，該數位輸入向量的元素可為代表該影像亮度(intensity)的8位元值，且該數位輸入向量的長度可從數十個元素(例如32個元素、64個元素)至數百個元素(例如256個元素、512個元素)不等。一般而言，任意大小的輸入資料集可被分割為多個數位輸入向量，該等數位輸入向量的大小適合該光電處理器140進行處理。在該輸入資料集的元素數量無法以該數位輸入向量的長度分割時，可使用補零法(zero padding)填補該資料集，以便使用該數位輸入向量的長度分割。該等各數位輸入向量經處理所得的輸出可被處理，以重

建一個完整輸出，該完整輸出為將該輸入資料集以ANN處理所得的結果。在某些實施中，將該輸入資料集分割為多個輸入向量的動作，以及隨後的向量層級處理動作，可用區塊矩陣乘法(block matrix multiplication)技術實施。

【0093】 該神經網路加權值為多個數值的集合，定義該ANN的人工神經元的連結情形(connectivity)，包括該等連結的相對重要性或加權值(weights)。一個ANN可包括一個或多個隱藏層，分別具有節點集合。當ANN具有單一隱藏層時，該ANN可被兩個神經網路加權值集合定義，其中一個集合對應該等輸入節點及該隱藏層的節點之間的連結情形，第二個集合對應該隱藏層及該等輸出節點之間的連結情形。每一個描述連結情形的神經網路加權值集合皆對應一個將由該光電處理器140實施的矩陣。對具有二個或更多隱藏層的ANN而言，需要更多的神經網路加權值集合，以定義該等額外隱藏層之間的連結情形。因此，一般而言，該等包含於該ANN運算請求中的神經網路加權值可包括多個神經網路加權值集合，分別代表該ANN各層之間的連結情形。

【0094】 由於該待處理的輸入資料集一般被分割為多個較小的數位輸入向量以個別處理，故該輸入資料集一般儲存於一數位記憶體中。然而，在記憶體與該電腦102的處理器之間的記憶體運作速度可能明顯慢於該ANN運算系統100可進行ANN運算的速度。例如，該ANN運算系統100在該電腦102的一個典型的記憶體讀取週期中可進行數十至數百次ANN運算。因此，若該ANN運算系統100

的ANN運算在處理ANN運算請求的過程中包含多個在該系統100及該電腦102之間的資料轉移，則該ANN運算系統100可進行ANN運算的速度可能被限制而低於其最高處理速度。例如，若該電腦102在提出請求時欲從其自身之記憶體存取該輸入資料集，並提供該等數位輸入向量予該控制器110，則該ANN運算系統100的運作將被在該電腦102與該控制器110之間所需的資料轉移序列所需的時間大幅拖慢。應注意，該電腦102的記憶體存取延遲時間(memory access latency)一般而言具有不確定性，此一事實進一步複雜化且降低了將數位輸入向量提供予該ANN運算系統100的速度。更進一步地，該電腦102的處理器週期可能被浪費在處理該電腦102與該ANN運算系統100之間的資料轉移上。

【0095】取而代之地，在某些實施中，該ANN運算系統100將該輸入資料集整個儲存於該記憶單元120中，該記憶單元120為該ANN運算系統100的一部分，且為該ANN運算系統100專用。該專用記憶單元120使該記憶單元120與該控制器110之間的傳輸得以被特別調整，以使該記憶單元120與該控制器110之間的資料流順暢而不中斷。此等不中斷的資料流使該光電處理器140得以在其最高速度下進行矩陣乘法運算，而不受傳統電腦(例如該電腦102)記憶體運作的緩慢速度限制，故可顯著提升該ANN運算系統100的總資料流通量(overall throughput)。更進一步地，由於進行該ANN運算的全部所需資料皆可在單一一次傳輸中由該電腦102提供至該ANN運算系統100，故該ANN運算系統100可獨立於該電腦102自

足地進行其ANN運算。該ANN運算系統100此等自足之運作可卸除該電腦102的運算負擔，並除去該ANN運算系統100運作過程中對外部裝置的依賴，可同時增進該系統100與該電腦102的效能。

【0096】 以下將敘述該光電處理器140與該MC單元130的實施範例。在某些實施中，該光電處理器140包括雷射單元142、調變器陣列144、光電矩陣乘法(optoelectronic matrix multiplication, OMM)單元150、及類比電子單元146。該調變器陣列144調變從該雷射單元142接收的光波，以基於由該MC單元130提供的已編碼輸入資料(例如數位輸入資料)提供一個長度為N的光學輸入向量，且該光學輸入向量傳播至該OMM單元150。該OMM單元150接收該長度為N的光學輸入向量，並在光學領域中對接收到的該光學輸入向量進行矩陣乘法。該矩陣乘法可為一 $N \times N$ 矩陣乘法，由該OMM單元150的內部配置決定。該OMM單元150的內部配置可由電訊號控制，例如由該MC單元130產生的電訊號。

【0097】 該OMM單元150可以多種方式實施。例如，該調變器陣列144及／或該OMM單元150使用的光學調變可包括多個相互連接的Mach-Zehnder干涉儀(Mach-Zehnder interferometers, MZI)。第2圖為一範例MZI 170的示意圖。該MZI 170包括第一輸入波導171、第二輸入波導172、第一輸出波導178、及第二輸出波導179。更進一步地，該等相互連接的多個MZI中的每一個MZI 170皆至少在其中一臂中包括第一移相器174，該第一移相器174被配置以改變該MZI 170的分光比

(splitting ratio)，並在某些範例中可在二臂中皆包括移相器，該等移相器被配置以進行推-拉(push-pull)操作。在某些實施中，第二移相器176被配置以移動該MZI 170的一個輸出的相位，例如經由該第二輸出波導179離開該MZI 170的光波。該等MZI 170的該等第一移相器174及該等第二移相器176與該等多個由該MC單元130產生的加權值控制訊號耦接。該等第一及第二移相器174與176為該OMM單元150中可重新配置元件的範例。該等可重新配置元件的範例包括熱光移相器(thermos-optic phase shifters)或電光移相器(electro-optic phase shifters)。熱光移相器的運作係藉由加熱該波導以改變該波導及覆蓋層材料的折射率，進而轉化為相位改變。電光移相器的運作係藉由外加一電場(例如鋰酸鋯(LiNbO<sub>3</sub>)、逆向偏壓PN界面)或電流(例如順向偏壓PIN界面)以改變該波導材料的折射率。藉由變化該等加權值控制訊號，可變化每一個該等相互連接的MZI 170的該等第一及第二移相器174與176的相位延遲，該等變化重新配置該OMM單元150的光學干涉單元154，以實施一特定矩陣乘法，該矩陣乘法由橫跨該光學干涉單元154全體的相位延遲決定。該OMM單元150及該光學干涉單元154的其他實施例，在美國專利公開文件編號US 2017/0351293 A1，標題

*APPARATUS AND METHODS FOR OPTICAL NEURAL NETWORK*、美國專利公開文件編號US 20190370652 A1，標題 *OPTOELECTRONIC COMPUTING SYSTEMS*、美國專利公開文件編號US 20200110992 A1，標題 *OPTOELECTRONIC*

*COMPUTING SYSTEMS*、及PCT專利公開文件編號WO

2020191217 A1，標題*OPTOELECTRONIC COMPUTING*

*SYSTEMS*等文獻中已有揭露；上述各文獻之所有內容，特此併入參照文件。

【0098】 該光學輸入向量經由該雷射單元142及該調變器陣列144產生。該長度為N的光學輸入向量具有N個獨立的光學訊號，其中每一光學訊號的強度皆對應一個長度為N的數位輸入向量中個別元素的值。例如，該雷射單元142可產生N個光輸出。在此範例中，該等N個光輸出的波長皆相同，且彼此相干(*coherent*)。該等光輸出的光學相干性使該等光輸出得以互相產生光學干涉，此一特性為該OMM單元150所利用(例如在該等MZI的運作中)。更進一步地，該雷射單元142的該等光輸出可大致上彼此相同。例如，該等N個光輸出可大致上具有齊一的強度(例如在5%、3%、1%、0.5%、0.1%或0.01%的誤差範圍內)及相對相位(例如在10度、5度、3度、1度、0.1度的誤差範圍內)。該等光輸出的齊一性可提升該光學輸入向量至該數位輸入向量的準確性，進而提升該光電處理器140的整體精確度。在某些實施中，該雷射單元142的該等光輸出的光功率可落在每個輸出0.1毫瓦至50毫瓦的範圍內、波長落在近紅外線的範圍內(例如900奈米至1600奈米之間)、譜線寬度(*linewidths*)小於1奈米。該雷射單元142的該等光輸出可為單橫向模式(*single transverse-mode*)光輸出。

【0099】 在某些實施中，該雷射單元142包括單一雷射光源及

一個光功率分離器(optical power splitter)。該單一雷射光源被配置以產生雷射光。該光功率分離器被配置以將該雷射光源產生的光分離為N個強度及相位大致相等的光輸出。藉由將單一雷射輸出分離為多個輸出，可達到該等多個光輸出的光學相干性。該單一雷射光源可以是例如半導體雷射二極體、垂直共振腔面射型雷射(vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)、分散式回饋(distributive feedback, DFB)雷射、或分散式Bragg反射器(distributed Bragg reflector)雷射。該光功率分離器可以是例如1:N多模干涉(multimode interference, MMI)分離器、包括多個1:2 MMI分離器或定向耦合器(directional couplers)的多階分離器、或星形耦合器(star coupler)。在某些其他實施中，可使用主-從(master-slave)雷射配置，其中該主要雷射對該等從屬雷射進行注入鎖定(injection locking)，以使該等從屬雷射與該主要雷射具有穩定的相位關係。

**【0100】** 該雷射單元142的該等光輸出耦接於該調變器陣列144。該調變器陣列144被配置以接收來自該雷射單元142的光輸入，並基於調變器控制訊號調變接收到的該等光輸入的強度，其中該等調變器控制訊號為電訊號。調變器的範例包括Mach-Zehnder干涉儀(MZI)調變器、環形諧振器(ring resonator)調變器、以及電吸收(electro-absorption)調變器。例如，電吸收調變器包括電極，該等電極外加一電場至一波導區段，以調變該波導區段的吸收光譜，進而調變於該波導區段中傳播的光的強度。該調變器陣列144

具有N個調變器，其中每一調變器皆接收該雷射單元142的N個光輸出之一。調變器接收一控制訊號，該控制訊號對應於該數位輸入向量的一個元素，並調變該光的強度。該控制訊號可由該MC單元130產生。

**【0101】** 該MC單元130被配置以在該控制器110的控制下產生多個調變器控制訊號，並產生多個加權值控制訊號。例如，該MC單元130自該控制器110接收第一調變器控制訊號，該第一調變器控制訊號對應於將由該光電處理器140處理的該等數位輸入向量。該MC單元130基於該第一調變器控制訊號產生該等調變器控制訊號，該等調變器控制訊號為類比訊號，適合驅動該調變器陣列144及該OMM 150。該等類比訊號可為電壓或電流，例如依據該陣列144及該OMM 150的調變器所使用的技術與設計而定。該等電壓的振幅範圍可落於例如±0.1伏特至±10伏特之間，而該等電流的振幅範圍可落於例如100微安培至100毫安培之間。在某些實施中，該MC單元130可包括調變器驅動器，被配置以緩衝、放大或調節該等類比訊號，使該陣列144及該OMM 150中的調變器可被充分驅動。例如，某些種類的調變器可用差分控制訊號(differential control signal)驅動。此時，該等調變器驅動器可為差分驅動器，基於一單端輸入訊號產生一差分電輸出。

**【0102】** 在某些實施中，該光電處理器140可包括某些種類的調變器，該等種類的調變器具有小於所欲該光電處理器140處理速度的3分貝頻寬。此時，該等調變器驅動器可包括預加重電路或其



他頻寬增加電路，該等電路被設計以延展該等調變器的運作頻寬。此等頻寬增加對於例如基於順向偏壓、使用載子注入技術以調變對被調變光波進行引導的波導一部分的折射率的PIN二極體結構調變器十分有用。例如，若該調變器為MZI調變器，則該PIN二極體結構可用於在該MZI調變器的一臂或二臂中實施移相器。對順向偏壓運作配置該移相器有助於形成較短的調變器長度及更加小巧的整體設計。該調變器陣列144及該OMM單元150之一或二者可包括基於順向偏壓、使用載子注入進行調變的PIN二極體結構調變器。此一特徵有助於於使該調變器陣列144及／或該OMM單元150(其可能具有大量調變器)更加小巧。

【0103】 在某些實施中，該調變器陣列144及該OMM單元150之一或二者可使用採取載子累積設計，並將MOS電容結構合併至該光波導的調變器，例如基於MOS電容的MZI調變器。調變器種類的選取，例如使用載子注入型或載子累積型，某種程度上可基於製造該光電處理器的整體半導體製程而定。

【0104】 例如，在預加重頻寬增加形式中，一個驅動調變器的類比電訊號(例如電壓或電流)可被形塑以包括一個瞬間脈衝(transient pulse)，該瞬間脈衝的振幅超越(overshoot)類比訊號的位準改變量，其中該類比訊號位準代表一連串數位資料值中的一個調變器控制訊號的給定數位資料值。每一數位資料值可具有任意多個位元，包括單一位元資料值；在本範例中，下列敘述將採用單一位元資料值之設定。因此，若一個位元的值與其先前值相同，則

該調變器驅動類比電訊號維持在穩態位準(例如對位元值0有訊號位準 $X_0$ 、對位元值1有較高訊號位準 $X_1$ )。然而，若一個位元從0變為1，則該對應調變器驅動類比電訊號可在該位元暫態的起始點(onset)包括一個峰值為 $X_1+(X_1-X_0)$ 的瞬間脈衝，直到趨於穩態值 $X_1$ 為止。相同地，若一個位元從1變為0，則該對應調變器驅動類比電訊號可在該位元暫態的起始點包括一個峰值為 $X_0+(X_0-X_1)$ 的瞬間脈衝，直到趨於穩態值 $X_0$ 為止。該瞬間脈衝的大小與長度可被選取以使頻寬增加效果最佳化(例如將不歸零(non-return-to-zero, NRZ)調變樣式中的眼圖(eye diagram)開口大小最大化)。

【0105】 在電荷幫浦形式的頻寬增加中，一個驅動調變器的類比電流訊號可被形塑以包括一個瞬間脈衝，該瞬間脈衝移動一精確預設數量的電荷。第3圖顯示電荷幫浦頻寬增加電路4416的一個實施範例，該電路使用一電容，串接於一電壓源與一調變器之間，以精確控制電荷流動。第3圖中顯示的電路的一部分可包含於前述的調變器驅動器中。在此範例中，該調變器以調變器電路4400表示，該調變器電路形塑該調變器的移相器的PIN二極體電特性。該調變器電路4400包括並聯的理想二極體、電容值為 $C_d$ 的電容、以及電阻值為 $R$ 的電阻。幫浦電容4402的電容值為 $C_p$ 。控制電壓波形4404被供應至反相器電路4405，以產生驅動電壓波形4406，該驅動電壓波形4406的振幅可經由該幫浦電容4402被精確校正，以移動一預設數量的電荷至／自該調變器電路4400。由該調變器電路4400形塑特性的PIN二極體，藉由外加一恆定電壓 $VDD\_IO$ 於端點1057-P00350YD1-TW/f

4408而處於順向偏壓狀態。電荷幫浦控制電壓VCP外加於該反相器4405的端點4410，以控制該驅動電壓波形4406在過渡狀態(transition)中抽送(pump)的電荷數量，以及由該調變器外加的對應光學相位偏移。

【0106】 該電壓VCP之值可在運作前被調整，使儲存於該電荷幫浦電容4402中的一額定電荷量(nominal charge)Q基於該電容 $C_p$ 的測量值(該測量值可能因例如製造過程的不確定性而有些許變化)被精確校正。例如，該電壓VCP可等於該額定電荷量Q除以該電容 $C_p$ 之值。其所造成波導與該PIN二極體相交的部分的折射率改變，可隨後提供被傳導的光波一個相位移，該相位移與電荷量Q成正比，其中該電荷量Q在該PIN二極體(例如經由該內部電容 $C_d$ 儲存)及該電荷幫浦電容4402之間移動。若該驅動電壓由低值改變至高值，則自該電荷幫浦電容4402至該PIN二極體的一個流入電流(inflow)在短時間內帶來一預先定義數量的電荷(亦即該正向電流對時間的積分)。若該驅動電壓由高值改變至低值，則自該PIN二極體至該電荷幫浦電容4402的一個流出電流(outflow)在短時間內移出一預先定義數量的電荷(亦即該負向電流對時間的積分)。在此一相對短的切換時間後，電流源4412提供一穩態電流，該穩態電流係由開關4414控制，用以替換當驅動電壓維持時(例如在一特定數位值的維持時間內)，因內部電容經由內部電阻R的流失電流而失去的電荷。此一電荷幫浦配置的使用，可具有例如較其他技術(包括某些預加重技術)更佳的精確度等優點，因在該短暫交換時間中移動的電

荷量乃依常數物理參數( $C_p$ )及穩態控制值(VCP)而定，故具有精確可控性及可重複性。

【0107】 其他形式的頻寬增加技術亦可使用。例如，可使用一匹配電路以形塑外加至調變光波的該半導體二極體的電訊號的振幅改變。一控制電訊號可經由一匹配電路外加至該半導體二極體，該匹配電路被配置以匹配與該半導體二極體關聯的阻抗值，而不明顯改變該外加電訊號的振幅(例如不引入預加重／去加重的振幅改變)。

【0108】 在某些實施中，該匹配電路為被動電路，例如基本上由電感組成的電路。例如，該電感的一端連接至一電壓源，且該電感的另一端連接至該調變器電路4400的一端。使用電感而非使用例如由電阻和電容構成的RC電路的被動匹配電路的一個優點，在於製造的一致性。合適RC電路的設計，一般藉由將轉移函數(transfer function)中的極點(pole)及其對應的零點(zero)相消，使該轉移函數趨近1，然而達成此一相消所需的設計容許誤差範圍使該裝置較易受製造誤差影響。例如，該相消可能需要微調(fine-tuning)電阻值與電容值不同的產品，使該等電阻值與電容值相等。反之，藉由使用具有合適電感值的電感(例如1至10奈亨利(nH))，可不須進行該等微調而達成匹配，因而較能容忍製造誤差。

【0109】 在某些情形下，該陣列144及／或該OMM 150的調變器可具有非線性轉移函數。例如，一個MZI光學調變器的外加控制電壓與其傳輸電壓之間可具有非線性關係(例如正弦相依

(sinusoidal dependence))。在此等情形下，該等第一調變器控制訊號可基於該等調變器的該非線性轉移函數被調整或補償，以使該等數位輸入向量與產生之該等光學輸入向量間的線性關係得以維持。維持此一線性關係一般而言對確保該 OMM 單元 150 的輸入得以準確代表該數位輸入向量乃為重要。在某些實施中，對該第一調變器控制訊號的補償可由該控制器 110 進行，藉由查找表(lookup table)將該數位輸入向量的一個值映射(map)至欲由該 MC 單元 130 輸出的一個值，使所得的該等調變光學訊號與該光學輸入向量的元素成正比。該查找表可由特徵化(characterizing)該調變器的非線性轉移函數、並計算該非線性轉移函數的反函數而產生。

【0110】 在某些實施中，該調變器的非線性特性及其導致所產生的光學輸入向量的非線性特性，可由 ANN 運算演算法補償。

【0111】 由該調變器陣列 144 產生的光學輸入向量為該 OMM 單元 150 的輸入。該光學輸入向量可為 N 個在空間上分離的光學訊號，其中每一光學訊號皆具有對應該數位輸入向量元素的光學能。該等光學訊號的光學能一般而言介於例如 1 微瓦( $\mu\text{W}$ )至 10 毫瓦(mW)之間。該 OMM 單元 150 接收該光學輸入向量，並基於其內部配置進行矩陣乘法運算。該內部配置由該 MC 單元 130 產生的電訊號控制。例如，該 MC 單元 130 自該控制器 110 接收一第二調變器控制訊號，該第二調變器控制訊號對應於將由該 OMM 單元 150 實施的神經網路加權值。該 MC 單元 130 基於該第二調變器控制訊號產生該等加權值控制訊號，該等加權值控制訊號為適合控制該 OMM 單元 150

中的可重新配置元件的類比訊號。該等類比訊號可為電壓或電流，例如依該 OMM 單元 150 的可重新配置元件的種類而定。該等電壓的振幅可介於例如 0.1 伏特 (V) 至 10 伏特之間，而該等電流的振幅可介於例如 100 微安培 ( $\mu\text{A}$ ) 至 10 毫安培 (mA) 之間。

**【0112】** 該調變器陣列 144 可在與該 OMM 單元 150 進行重新配置的重新配置率不同的調變率下運作。由該調變器陣列 144 產生的光學輸入向量以光速的相當大一部分之速度經由該 OMM 單元傳播 (例如光速的 80%、50% 或 25%)，依該 OMM 單元 150 的光學特性 (例如有效折射率) 而定。對一個典型的 OMM 單元 150 而言，該光學輸入向量的傳播時間介於 1 至數十皮秒 (picoseconds) 之間，對應數十至數百 GHz 之處理率。因此，該光電處理器 140 處理矩陣乘法操作的頻率，一部分受限於該光學輸入向量產生的頻率。具有數十 GHz 頻寬的調變器已可輕易取得，而具有超過 100 GHz 頻寬的調變器正在開發中。因此，該調變器陣列 144 的調變率可介於例如 5 GHz、8 GHz 或數十 GHz 至數百 GHz 之間。為了將該調變器陣列 144 的運作維持在上述調變率，該控制器 110 的積體電路可被配置為在大於或等於例如 5 GHz、8 GHz、10 GHz、20 GHz、25 GHz、50 GHz 或 100 GHz 的頻率下，輸出控制訊號供該 MC 單元 130 使用。

**【0113】** 該 OMM 單元 150 的重新配置率可明顯慢於該調變率，依該 OMM 單元 150 實施的可重新配置元件的種類而定。例如，該 OMM 單元 150 的可重新配置元件可為熱光 (thermo-optic) 種類，使用微型加熱器 (micro-heater) 調整該 OMM 單元 150 的光波導

溫度，進而影響該 OMM 單元 150 內光學訊號的相位，形成矩陣乘法。由於與結構的加熱及冷卻相關的熱時間常數(thermal time constant)的影響，該重新配置率可被限制在例如數百 kHz 至數十 MHz 之間。因此，控制該調變器陣列 144 的該調變器控制訊號及重新配置該 OMM 單元 150 的該等加權值控制訊號可具有明顯不同的速度要求。更進一步地，該調變器陣列 144 的電學特徵可明顯不同於該 OMM 單元 150 的該等可重新配置元件的電學特徵。

【0114】 為容納該等調變器控制訊號及加權值控制訊號的不同特徵，在某些實施中，該 MC 單元 130 可包括第一 MC 子單元 132 及第二子單元 134。該第一 MC 子單元 132 可被專門配置以產生該等調變器控制訊號供該輸入向量使用，且該第二 MC 子單元 134 可被專門配置以產生該等加權值控制訊號供該矩陣乘法使用。例如，該調變器陣列 144 的調變率可為 25 GHz，且該第一 MC 子單元 132 可具有每秒 250 億取樣數的每通道輸出更新率(per-channel output update rate)及 8 位元或更高的解析度。該 OMM 單元 150 的重新配置率可為 1 MHz，且該第二 MC 子單元 134 可具有每秒 1 百萬取樣數的輸出更新率及 10 位元的解析度。將 MC 子單元 132 與 134 分離的實施，可使該等 MC 子單元獲得獨立的最佳化供其各自對應的訊號使用，可減少該 MC 單元 130 的總功率消耗、複雜度、成本或以上三者之組合。應注意，儘管該等 MC 子單元 132 及 134 被描述為該 MC 單元 130 的子元件，然而一般而言該等 MC 子單元 132 及 134 可整合在一共同晶片中，或以分離的多個晶片實施。

【0115】 基於該第一MC子單元132與該第二MC子單元134的不同特徵，在某些實施中，該記憶單元120可包括第一記憶子單元及第二記憶子單元。該第一記憶子單元可為一記憶體，專為儲存該輸入資料集與該等數位輸入向量而設置，並可具有足以支援該調變率的運作速度。該第二記憶子單元可為一記憶體，專為儲存該等神經網路加權值而設置，並可具有足以支援該OMM單元150重新配置率的運作速度。在某些實施中，該第一記憶子單元可使用靜態隨機存取記憶體(SRAM)實施，而該第二記憶子單元可使用動態隨機存取記憶體(DRAM)實施。在某些實施中，該第一及第二記憶子單元可使用DRAM實施。在某些實施中，該第一記憶子單元可作為該控制器110的一部分或快取(cache)被實施。在某些實施中，該第一及第二記憶子單元可使用單一實體記憶體裝置的不同位址空間實施。

【0116】 該OMM單元150輸出一長度為N的輸出向量，該向量對應該光學輸入向量及該等神經網路加權值的 $N \times N$ 矩陣乘法的運算結果。在某些實施中，該輸出向量可包括電訊號(例如電壓或電流)，而在其他實施中該輸出向量可包括光學訊號。該OMM單元150耦接至類比電子單元146，該類比電子單元146被配置，以對該輸出向量為一光學輸出向量的實施進行任何類比電子處理，該類比電子單元146亦可被配置以進行光-電轉換。例如，該類比電子單元146可包括具有N個光感測器(photodetectors)的陣列，該陣列被配置以吸收該等光學訊號並產生光電流(photocurrents)，以及具有N個



轉阻放大器(transimpedance amplifiers)的陣列，該陣列被配置以將該等光電流轉換為該等輸出電壓。或者，若自該 OMM 單元 150 接收一個電輸出向量，則該 OMM 單元 150 內可具有光感測器及轉阻放大器。該等光感測器及轉阻放大器的頻寬可基於該調變器陣列 144 的調變率而設定。該等光感測器可由多種材料形成，基於該光學輸出向量被偵測到的波長而定。該等光感測器材料的範例包括鍺(germanium)、矽-鍺合金及砷化銦鎵(indium gallium arsenide, InGaAs)。

【0117】 該類比電子單元 146 耦接至 ADC 單元 160。該 ADC 單元 160 被配置以將來自該類比電子單元 146 的 N 個電訊號輸出轉換為 N 個數位化光學輸出，其中該等數位化光學輸出為該等輸出電壓的量化數位表徵。例如，該 ADC 單元 160 可為 N 通道 ADC。該控制器 110 可自該 ADC 單元 160 獲得該 N 個數位化光學輸出，對應至該光學矩陣乘法單元 150 的光學輸出向量。該控制器 110 可自該 N 個數位化光學輸出形成一長度為 N 的數位輸出向量，對應至該長度為 N 的數位輸入向量的  $N \times N$  矩陣乘法的運算結果。在某些實施中，若無類比電子處理需要進行，且該 OMM 單元 150 提供電輸出訊號，則該類比電子單元 146 可略去，且該 OMM 單元 150 可直接連接至該 ADC 單元 160。

【0118】 該 ANN 運算系統 100 的各種電子部件可以多種不同方式整合。例如，該控制器 110 可為製造在半導體晶粒(die)上的特定應用積體電路(application specific integrated circuit)。其他

電子部件，例如記憶單元120、MC單元130、ADC單元160或以上三者之組合，可單片(monolithically)整合於該控制器110所在的半導體晶粒上。又例如，二個或更多電子部件可整合為一系統單晶片(System-on-Chip, SoC)。在SoC的實施中，控制器110、記憶單元120、MC單元130及ADC單元160可製造在個別的晶粒上，且該等個別的晶粒可整合在一共同平台上(例如載板(interposer))，該共同平台提供該等整合部件之間的電連接。此一SoC方式可使該ANN運算系統100的各電子部件之間的資料傳輸相較於該等部件分開佈設並在印刷電路板(PCB)上繞線的方式具有更快的速度，從而增進該ANN運算系統100的運作速度。更進一步地，此SoC方式允許對不同電子元件使用不同的最佳化製造技術，可增進該等不同部件的效能，且相較於單片整合方式可降低整體成本。儘管上文敘述了控制器110、記憶單元120、MC單元130及ADC單元160全部整合的情形，然而一般而言，吾人亦可因諸多理由，例如效能或成本之考量，而僅整合該等部件之子集合，並將其他部件以離散部件的形式實施。例如，在某些實施中，記憶單元120可作為控制器110內的一功能區塊(functional block)與控制器110整合。

**【0119】** 該ANN運算系統100的各種光學部件亦可以多種不同方式整合。該ANN運算系統100的光學部件的範例包括雷射單元142、調變器陣列144、OMM單元150及類比電子單元146的光感測器。此等光學部件可以多種方式整合，以增進效能及／或降低成本。例如，雷射單元142、調變器陣列144、OMM單元150及光感測器

可單片整合於一共同半導體基板上，形成光子積體電路(photonic integrated circuit, PIC)。在一個基於化合物半導體材料系統(例如III-V族化合物半導體，例如磷化銦(InP))形成的光子積體電路中，雷射、調變器(例如電吸收調變器)、波導及光感測器可單片整合於單一晶粒上。此種單片整合方式可降低排列多個離散光學部件輸入及輸出的複雜度，其中該排列所需的精確度介於次微米(sub-micron)至數微米之間。又例如，雷射單元142的雷射源可製造在一化合物半導體晶粒上，而該雷射單元142的光功率分離器、調變器陣列144、OMM單元150及光感測器可製造在一矽晶粒上。製造在矽晶圓上的PIC(又可稱為「矽光子技術」)，相較於III-V族PIC，一般具有較大的整合密度、較高的光刻解析度(lithographic resolution)及較低的成本。此一較大的整合密度可有益於OMM單元150的製造，因OMM單元150一般包括數十至數百個光學部件，例如功率分離器及移相器。更進一步地，矽光子技術較高的光刻解析度可降低OMM單元150的製造變異(fabrication variation)，增進了OMM單元150的精確度。

【0120】 該ANN運算系統100可以多種形成要素實施。例如，該ANN運算系統100可以插入主機電腦(host computer)的協同處理器(co-processor)實施。此一系統100可具有例如高速外設組件互連標準(Peripheral Component Interconnect Express, PCIe)卡等形成要素，並經由該PCIe匯流排與該主機電腦通訊。該主機電腦可作為多個協同處理器類型ANN運算系統100的主機，並

可經由網路連接至電腦102。此種實施適合用於雲端資料中心 (cloud datacenter)，在雲端資料中心內可將多架伺服器專用於處理接收自其他電腦或伺服器的ANN運算請求。又例如，該協同處理器類型ANN運算系統100可直接插入發出該等ANN運算請求的電腦102中。

【0121】 在某些實施中，控制器110、記憶單元120、調變器控制單元130、ADC單元160及一微處理器可單片整合於一半導體晶粒上。在某些實施中，控制器110、記憶單元120、調變器控制單元130、ADC單元160、微處理器及系統主記憶體可整合為系統單晶片。例如，此一實施使該ANN運算系統100可用於可攜式裝置，例如筆記型電腦、平板電腦或行動電話。該微處理器可包括例如多個高效能(performance)處理器核心、多個高效率(efficiency)處理器核心、多個圖形處理器、多個電子神經引擎(neural engine)核心、一階快取(cache)及二階快取。該微處理器可使用該等電子神經引擎核心執行針對習知的電子神經引擎核心最佳化的人工神經網路運算指令，並使用該ANN運算系統100執行針對由光電處理器140進行的光學處理最佳化的人工神經網路運算指令。該微處理器可為例如精簡指令集電腦(reduced instruction set computer)或複雜指令集電腦(complex instruction set computer)。作業系統可被設計以顧及該ANN運算系統100，例如將該ANN運算系統100通電以進行較適合由該ANN運算系統100進行的特定任務，並在不進行此等任務時將該ANN運算系統100斷電或設為待機模式，從而

達成整體的高運算效能及低功耗。

【0122】 在某些實施中，該ANN運算系統100可整合至需要即時(real-time)ANN運算能力的實體系統中。例如，高度仰賴即時人工智能任務的系統，例如自動駕駛車輛、自動駕駛無人機、物件或臉部辨識監視器、及多種物聯網(Internet-of-Things, IoT)裝置，皆可因具有直接與該等系統中其他子系統整合的ANN運算系統100而獲益。具有直接整合的ANN運算系統100可使缺乏網際網路連線或連線狀況不佳的設備得以實現即時人工智能，並提升關鍵任務(mission-critical)人工智能系統的可靠度與可用性。

【0123】 儘管MC單元130及ADC單元160在圖式中被繪製為耦接至控制器110，然而在某些實施中，該MC單元130、該ADC單元160或二者亦可替換地或附加地耦接至記憶單元120。例如，由該MC單元130或該ADC單元160進行的直接記憶體存取(direct memory access, DMA)操作，可降低該控制器110的運算負擔，並降低該記憶單元120的讀取與寫入延遲，進一步增進該ANN運算系統100的運作速度。

【0124】 第4圖為一流程圖，顯示進行ANN運算的程序200的範例。該程序200的步驟可由控制器110進行。在某些實施中，該程序200的多個步驟可以平行、組合、迴圈或任何順序進行。

【0125】 在步驟210中，一個包括輸入資料集與第一組神經網路加權值的ANN運算請求被接收。該輸入資料集包括第一數位輸入向量。該第一數位輸入向量為該輸入資料集的一個子集合。例如，

其可為一影像的一個子區域。該ANN運算請求可由多種實體產生，例如電腦102。該電腦可包括一種或多種電腦裝置，例如個人電腦、伺服器電腦、車輛電腦及飛行電腦(flight computer)。該ANN運算請求一般指一電訊號，該電訊號將需進行的ANN運算通知或告知該ANN運算系統100。在某些實施中，該ANN運算請求可被劃分為二個或更多訊號。例如，一個第一訊號可對該ANN運算系統100發出詢問(query)，以檢查該系統100是否準備好接收該輸入資料集與該第一組神經網路加權值。回應於該系統100的肯定確認，該電腦可傳送一個第二訊號，包括該輸入資料集與該第一組神經網路加權值。

【0126】 在步驟220中，該輸入資料集與該第一組神經網路加權值被儲存。控制器110可將該輸入資料集與該第一組神經網路加權值儲存在記憶單元120中。將該輸入資料集與該第一組神經網路加權值儲存在記憶單元120中的動作可使該ANN運算系統100的運作具有彈性，可達到例如增進該系統的整體效能之效果。例如，該輸入資料集可藉由自該記憶單元120提取該輸入資料集中的所欲部分，被劃分為多個具有預先設定的大小及格式的數位輸入向量。該輸入資料集的不同部分可以多種順序被處理或挪移(shuffle)，以使多種ANN運算得以進行。例如，當輸入矩陣與輸出矩陣大小不同時，挪移的動作使利用區塊矩陣乘法技術進行的矩陣乘法運算得以進行。又例如，將該輸入資料集與該第一組神經網路加權值儲存在記憶單元120中的動作使該ANN運算系統100的多個ANN運算請

求的佇列(queuing)得以形成，使該系統100得以維持全速運作而不會有不運作的時段。

**【0127】** 在某些實施中，該輸入資料集可被儲存在第一記憶子單元中，而該第一組神經網路加權值可被儲存在第二記憶子單元中。

**【0128】** 在步驟230中，第一組調變器控制訊號基於該第一數位輸入向量而產生，且第一組加權值控制訊號基於該第一組神經網路加權值而產生。控制器110可傳送一個第一調變器控制訊號至MC單元130以產生該第一組調變器控制訊號。該MC單元130基於該第一調變器控制訊號產生該第一組調變器控制訊號，且調變器陣列144產生代表該第一數位輸入向量的光學輸入向量。

**【0129】** 該第一調變器控制訊號可包括將由MC單元130轉換為該第一組調變器控制訊號的多個數位值。該等數位值通常對應於該第一數位輸入向量，並可經由多種數學關係或查找表與該第一數位輸入向量關聯。例如，該等數位值可與該第一數位輸入向量的各元素值成正比。又例如，該等數位值可經由一查找表與該第一數位輸入向量的各元素關聯，其中該查找表被設置以維持該數位輸入向量與由調變器陣列144產生的光學輸入向量之間的線性關係。

**【0130】** 控制器110可傳送第二調變器控制訊號至MC單元130以產生該第一組加權值控制訊號。該MC單元130基於該第二調變器控制訊號產生該第一組加權值控制訊號，且OMM單元150根據該第一組加權值控制訊號被重新配置，並對應於該第一組神經網路

加權值實施一矩陣。

【0131】 該第二調變器控制訊號可包括將由MC單元130轉換為該第一組加權值控制訊號的多個數位值。該等數位值通常對應於該第一組神經網路加權值，並可經由多種數學關係或查找表與該第一組神經網路加權值關聯。例如，該等數位值可與該第一組神經網路加權值的各元素值成正比。又例如，該等數位值可經由對該第一組神經網路加權值進行多種數學運算而得，以產生加權值控制訊號，該等加權值控制訊號可配置該OMM單元150以進行對應於該第一組神經網路加權值的矩陣乘法。

【0132】 在步驟240中，一個對應於該光學矩陣乘法單元的光學輸出向量的第一組數位化光學輸出被獲取。由調變器陣列144產生的光學輸入向量被OMM單元150處理並轉換為一光學或電輸出向量。若該輸出向量為光學輸出向量，則該光學輸出向量被類比電子單元146偵測並轉換為多個電訊號，該等電訊號可由ADC單元160轉換為數位化數值。例如，控制器110可傳送一轉換請求至該ADC單元160，以開始將該類比電子單元146輸出的電壓轉換為數位化光學輸出。當轉換完成後，該ADC單元160可傳送該轉換結果至該控制器110。該控制器110可自該等數位化光學輸出形成一數位輸出向量，對應於該數位輸入向量的矩陣乘法運算結果。例如，該等數位化光學輸出可被組織或串接以具有向量形式。

【0133】 在某些實施中，ADC單元160可被設定或控制以基於由控制器110對MC單元130發出的調變器控制訊號進行ADC轉



換。例如，該ADC轉換可被設定以在該MC單元130產生該調變器控制訊號後的一預設時間開始。對ADC轉換的此一控制可簡化控制器110的運作，並減低所需控制操作的數量。

【0134】 在步驟250中，對該第一數位輸出向量進行非線性轉換，以產生一第一轉換數位輸出向量。ANN的一個節點(node)或人工神經元(artificial neuron)的運作，首先對接收自前一層各節點的訊號進行加權和，隨後對該加權和進行非線性轉換(「啟用」)以產生一輸出。多種ANN可實施多種可微分非線性轉換。非線性轉換函數的範例包括整流線性單位(rectified linear unit, RELU)函數、Sigmoid函數、雙曲正切函數、 $X^2$ 函數及 $|X|$ 函數。此等非線性轉換由控制器110對該第一數位輸出進行，以產生該第一轉換數位輸出向量。在某些實施中，該等非線性轉換可由該控制器110內的一專用數位積體電路進行。例如，該控制器110可包括一個或多個專為加速一種或多種非線性轉換運算而調整的模組或電路區塊。

【0135】 在步驟260中，該第一轉換數位輸出向量被儲存。控制器110可儲存該第一轉換數位輸出向量於記憶單元120中。若該輸入資料集被分割為多個數位輸入向量，則該第一轉換數位輸出向量對應於該輸入資料集一部分的ANN運算結果，例如該第一數位輸入向量。因此，儲存該第一轉換數位輸出向量使ANN運算系統100得以進行與儲存對該輸入資料集其他數位輸入向量的運算，該等運算隨後將併入單一ANN輸出。

【0136】 在步驟270中，一個基於該第一轉換數位輸出向量產

生的人工神經網路輸出被輸出。控制器110產生一ANN輸出，該ANN輸出為經由被該第一組神經網路加權值定義的ANN處理該輸入資料集的結果。若該輸入資料集被分割為多個數位輸入向量，則產生的ANN輸出為包括該第一轉換數位輸出的合併輸出，然而其亦可進一步包括對應於該輸入資料集其他部分的另一些轉換數位輸出。當該ANN輸出產生後，該輸出被傳送至發起該ANN運算請求的一電腦，例如電腦102。

【0137】 吾人可對實施程序200的ANN運算系統100定義多種效能測量指標。定義效能測量指標可使吾人得以比較實施光電處理器140的ANN運算系統及實施電子矩陣乘法單元的其他ANN運算系統的效能。就一方面而言，ANN運算的進行速率可部分地以由步驟220在記憶單元中儲存輸入資料集與第一組神經網路加權值與步驟260在記憶單元中儲存第一轉換數位輸出向量之間的經過時間定義的第一迴圈時間表示。因此，該第一迴圈時間可包括將電訊號轉換為光學訊號(例如步驟230)、在光學領域進行矩陣乘法、及將結果轉換回電領域(例如步驟240)所花費的時間。步驟220與260皆包括儲存資料至記憶單元120，此等步驟乃ANN運算系統100與習知不含光電處理器140的ANN運算系統所共有。因此，以第一迴圈時間測量記憶體至記憶體的傳輸時間，可使吾人得以對ANN運算系統100與不含光電處理器140的ANN運算系統(例如實施電子矩陣乘法單元的系統)的ANN運算產出量(throughput)進行切合實際或公正的比較。

【0138】 基於調變器陣列144產生該等光學輸入向量的速率(例如25 GHz)及OMM單元150的處理速率(例如大於100 GHz)，ANN運算系統100對單一數位輸入向量進行單一ANN運算的第一迴圈時間可達到調變器陣列144速率的倒數，例如40皮秒。在考慮與MC單元130產生訊號及ADC單元160進行ADC轉換相關的延遲後，該第一迴圈時間可例如小於或等於100皮秒、小於或等於200皮秒、小於或等於500皮秒、小於或等於1奈秒、小於或等於2奈秒、小於或等於5奈秒、或小於或等於10奈秒。

【0139】 作為比較，電子矩陣乘法單元將一個 $M \times 1$ 向量和一個 $M \times M$ 矩陣相乘的執行時間一般而言與 $M^2 - 1$ 個處理器時脈週期成正比。當 $M=32$ 時，此一乘法運算將花費約1024個週期，在3 GHz的時脈速度下造成超過300奈秒的執行時間，較ANN運算系統100的第一迴圈時間慢了數個數量級。

【0140】 在某些實施中，程序200更包括基於該第一轉換數位輸出向量產生第二組調變器控制訊號的步驟。在某些ANN運算種類中，單一的數位輸入向量可被重複地經由同一ANN傳播、或被同一ANN處理。實施多次通過(multi-pass)處理的ANN可稱為循環神經網路(recurrent neural network, RNN)。RNN為一神經網路，其中該網路在第 $k$ 次通過該神經網路的輸出會回授至該神經網路的輸入端，以作為第 $(k+1)$ 次通過的輸入。RNN在組型辨識(pattern recognition)任務上可有各種應用，例如語音或手寫辨識。當該第二組調變器控制訊號產生後，程序200可由步驟240前進至步驟260

以完成該第一數位輸入向量對ANN的第二次通過。一般而言，將該轉換數位輸出回授以作為數位輸入向量的動作可重複一預設數量的次數，依ANN運算請求中所接收的RNN特徵而定。

【0141】 在某些實施中，程序200更包括基於一第二組神經網路加權值產生第二組加權值控制訊號的步驟。在某些情形中，該ANN運算請求更包括一第二組神經網路加權值。一般而言，一個ANN除了輸入層與輸出層之外，還包括一個或多個隱藏層。對具有二個隱藏層的ANN而言，該第二組神經網路加權值可對應於例如該ANN第一層與該ANN第二層之間的連結情形(connectivity)。為了經由該ANN的二個隱藏層處理該第一數位輸入向量，該第一數位輸入向量可首先依程序200被處理至步驟260，在步驟260中經由該ANN的第一隱藏層處理該第一數位輸入向量的結果被儲存於記憶單元120中。控制器110接著重新配置OMM單元150，以進行對應於與該ANN的第二隱藏層關聯的第二組神經網路加權值的矩陣乘法。當OMM單元150被重新配置後，程序200可基於該第一轉換數位輸出向量產生該組調變器控制訊號，其產生一對應於該第一隱藏層的輸出的更新光學輸入向量。該更新光學輸入向量接著被已重新配置的OMM單元150處理，其中該已重新配置的OMM單元150對應於該ANN的第二隱藏層。一般而言，上述各步驟可重複進行，直到該數位輸入向量經由該ANN的所有隱藏層被處理為止。

【0142】 如前文所述，在OMM單元150的某些實施中，該OMM單元的重新配置率可明顯慢於調變器陣列144的調變率。在此

種情形下，ANN運算系統100的產出量可能受到重新配置OMM單元150所需時間的負面影響，因在該時間中無法進行ANN運算。為減低OMM單元150相對較慢的重新配置時間所造成的影響，可使用批量(batch)處理技術，在此技術中二個或更多數位輸入向量經由該OMM單元150傳播而無須改變配置，以將重新配置時間分攤於大量數位輸入向量之中。

【0143】 第5圖顯示圖表290，圖示第4圖中程序200的一個態樣。對具有二個隱藏層的ANN而言，如圖表290上半部所示，該輸入資料集的所有數位輸入向量可首先經由被配置為對應第一隱藏層的OMM單元150(配置#1)被處理，而非經由該第一隱藏層處理該第一數位輸入向量、重新配置OMM單元150以對應該第二隱藏層、經由已重新配置的OMM單元150處理該第一數位輸出向量(來自前一隱藏層)、並重複上述動作以處理其他數位輸入向量。當所有數位輸入向量皆被具有配置#1的OMM單元150處理後，該OMM單元150被重新配置為配置#2，其對應於該ANN的第二隱藏層。此一重新配置可明顯慢於OMM單元150處理該等輸入向量的速率。當OMM單元150被重新配置為對應該第二隱藏層後，來自前一隱藏層的該等輸出向量可由該OMM單元150批量處理。對具有數萬或數十萬個數位輸入向量的大型輸入資料集而言，重新配置時間所造成的影響可以約略相同的倍數減低，可大幅減少重新配置在ANN運算系統100的花費時間中所占的比例。

【0144】 為實施批量處理，在某些實施中，程序200更包括經

由MC單元130基於該第二數位輸入向量產生第二組調變器控制訊號；自ADC單元獲取第二組數位化光學輸出，對應於該光學矩陣乘法單元的光學輸出向量，該第二組數位化光學輸出形成第二數位輸出向量；對該第二數位輸出向量進行非線性轉換，以產生第二轉換數位輸出向量；以及在該記憶單元中儲存該第二數位輸出向量。例如，該第二組調變器控制訊號的產生可接續於步驟260之後。更進一步地，此情形中步驟270的ANN輸出乃同時基於該第一轉換數位輸出向量及該第二轉換數位輸出向量。上述獲取、進行(非線性轉換)及儲存步驟與步驟240至260類似。

**【0145】** 批量處理技術為提升ANN運算系統100產出量的數種技術中的一種。另一種提升ANN運算系統100產出量的技術是經由使用波長分波多工(wavelength division multiplexing, WDM)以平行處理多個輸入向量。WDM是一種經由一共同傳播通道同時傳播多個波長不同的光學訊號的技術，例如OMM單元150中的波導。不同於電訊號，波長不同的多個光學訊號可經由一共同通道傳播，而不影響同一通道中其他波長不同的光學訊號。更進一步地，光學訊號可使用習知結構從一共同傳播通道中被加入(多工)或去除(解多工)，例如光學多工器與解多工器。

**【0146】** 在ANN運算系統100的脈絡中，多個波長不同的光學輸入向量可獨立產生、同時經由OMM單元150傳播、並被獨立偵測，以提升ANN運算系統100的產出量。參見第6圖，圖示一個波長分波多工(WDM)人工神經網路(ANN)運算系統104的範例。除非

另有敘述，否則該 WDM ANN 運算系統 104 與 ANN 運算系統 100 相似。為實施 WDM 技術，在 ANN 運算系統 104 的某些實施中，雷射單元 142 被設置為產生多個波長，例如  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ 。該等波長最好以足夠大的波長間隔相互分開，以利於在一共同傳播通道上進行多工及解多工。例如，大於 0.5 奈米、1.0 奈米、2.0 奈米、3.0 奈米或 5.0 奈米的波長間隔可使多工及解多工容易進行。另一方面，該等波長中最短波長與最長波長間的範圍(「WDM 頻寬」)最好足夠小，以使 OMM 單元 150 的特徵或效能在該等波長中皆約略維持相等。光學部件一般而言具有色散性(dispersive)，意指其光學特徵隨波長以一函數改變。例如，MZI 的功率分離比(power splitting ratio)可隨波長改變。然而，藉由將 OMM 單元 150 設計為具有足夠大的運作波長窗口(operating wavelength window)，以及藉由將波長限制於該運作波長窗口內，由 OMM 單元 150 輸出的光學輸出向量在每一波長下皆可為該 OMM 單元 150 實施的矩陣乘法的足夠精確的結果。例如，該運作波長窗口可為 1 奈米、2 奈米、3 奈米、4 奈米、10 奈米或 20 奈米。

【0147】 第 7 圖圖示一個 Mach-Zehnder 調變器 3900 的範例，該調變器可用於調變光學訊號的振幅。該 Mach-Zehnder 調變器 3900 包括二個  $1 \times 2$  埠多模干涉耦合器( $1 \times 2$  port multi-mode interference coupler, MMI<sub>1x2</sub>) 3902a 與 3902b、二個平衡臂 3904a 與 3904b、及在一臂上的移相器 3906(或在每一臂上各具有一個移相器)。當一電壓經由訊號線 3908 被外加至一臂上的移相器

時，將在該二臂3904a與3904b之間產生相位差，該相位差將轉換為振幅調變。該等1×2埠多模干涉耦合器3902a與3902b及該移相器3906被配置為寬頻光子部件，且該二臂3904a與3904b的光徑長被配置為相等。此一配置使該Mach-Zehnder調變器3900得以運作於寬廣的波長範圍。

【0148】 第8圖圖示另一個Mach-Zehnder調變器3950的範例，該調變器可用於調變光學訊號的振幅。該Mach-Zehnder調變器3950包括二個1×2埠多模干涉耦合器(MMI<sub>1×2</sub>)3952a與3952b、二個平衡臂3954a與3954b、及在一臂上的一組移相器3956a、3956b及3956c(或在每一臂上各具有一組移相器)。該調變器3950使用片段式設計，以對數位輸入訊號的每一位元使用不同的移相器提供光學數位至類比轉換。例如，數位輸入埠可被配置為在連續的時間間隔中接收串列的數位輸入值，其中每一數位輸入值包括三個位元。例如，該數位輸入埠亦可被配置為平行接收該等數位輸入值。該等移相器3956a、3956b及3956c可藉由沿著該臂3954a的光波導分別形成不同的二極體區段來實施。在此範例中，每一個別的移相器3956a、3956b及3956c的二極體區段皆包括半導體二極體與電接點，以於順向偏壓狀態下外加一電訊號至該半導體二極體，以提供載子注入，以調變對應於該移相器的波導區段的折射率。此一配置使每一二極體區段的折射率得以回應於該三位元數位輸入值中的不同對應位元值被調變。該等二極體區段的相對長度乃對應於每一位元的位元位置而選擇。因此，在每一數位輸入值具有三個



位元的範例中，最高位元被用於施加二元(0或1)調變至長度為 $4L$ 的移相器3956a、次一位元被用於施加二元(0或1)調變至長度為 $2L$ 的移相器3956b、且最低位元被用於施加二元(0或1)調變至長度為 $L$ 的移相器3956c。一同地，該等二極體區段施加各自不同的調變貢獻至經由該光波導部分傳播的光波，以提供適當的數位至類比轉換。

【0149】 移相器為一種光學調變器。在本說明書中，「調變器」一詞，依據文本脈絡，可指涉例如整個調變器3950、移相器3956、或一光學振幅調變器。

【0150】 參見第9圖，在某些實施中，調變器3950包括第一臂3954a中的一第一脊狀波導(rib waveguide)3964a及第二臂3954b中的一第二脊狀波導3964b。該第一及第二脊狀波導3964a及3964b乃形成於一半導體基板上(例如矽基板)。移相器3956a包括一重摻雜(heavily doped)p+區域3960a及一重摻雜n+區域3960b，其長度為 $4L$ ，且是形成於該基板上，位於該第一脊狀波導3964a的第一區段的兩側。該p+區域、該p+及n+區域之間的本質(intrinsic)區域及該n+區域形成一p+-i-n+(PIN)二極體。第一電極(陽極)3962a電耦接於該p+區域3960a，且第二電極(陰極)3962b電耦接於該n+區域3960b。

【0151】 該第一及第二電極3962a及3962b可被一驅動電路3966a驅動，該驅動電路3966a與第3圖中所示之電路相似。驅動電路3966a被配置為移動一預設數量的電荷至／自移相器3956a，以控制由移相器3956a施加的對應光學相位移。驅動電路3966a包括

一幫浦電容4402a，其電容值為 $C_{p\_a}$ 。控制電壓波形4404a被供應至反相器電路4405a，以產生驅動電壓波形4406a，其振幅可被精準校正，以經由幫浦電容4402a移動一預設數量的電荷至／自移相器3956a。移相器3956a的PIN二極體藉由外加一恆定電壓VDD\_IO於端點4408a而處於順向偏壓狀態。電荷幫浦控制電壓VCP被外加至反相器4405a的端點4410a，以控制該驅動電壓波形4406a在過渡狀態(transition)中抽送(pump)的電荷數量，以及由移相器3956a施加的對應光學相位移。為圖式清晰易懂起見，圖中各驅動電路3966及移相器3956之間的詳細連接情形被略去不繪。

【0152】 移相器3956b包括一重摻雜p+區域3968a及一重摻雜n+區域3968b，其長度為 $2L$ ，且是形成於該基板上，位於該第一脊狀波導3964a的第二區段的兩側。該p+區域、該p+及n+區域之間的本質區域及該n+區域形成一p+-i-n+(PIN)二極體。第三電極(陽極)3970a電耦接於該p+區域3968a，且第四電極(陰極)3970b電耦接於該n+區域3968b。該第三及第四電極3970a及3970b可被一驅動電路3966b驅動，該驅動電路3966b與驅動電路3966a相似。控制電壓波形4404b被供應至反相器電路，以產生一驅動電壓波形，其振幅可被精準校正，以經由一幫浦電容移動一預設數量的電荷至／自移相器3956b。驅動電路3966b被配置為移動一預設數量的電荷至／自移相器3956b，以控制由移相器3956b施加的對應光學相位移。

【0153】 移相器3956c包括一重摻雜p+區域3972a及一重摻

雜n+區域3972b，其長度為L，且是形成於該基板上，位於該第一脊狀波導3964a的第三區段的兩側。該p+區域、該p+及n+區域之間的本質區域及該n+區域形成一p+-i-n+(PIN)二極體。第五電極(陽極)3974a電耦接於該p+區域3972a，且第六電極(陰極)3974b電耦接於該n+區域3972b。該第五及第六電極3974a及3974b可被一驅動電路3966c驅動，該驅動電路3966c與驅動電路3966a相似。控制電壓波形4404c被供應至反相器電路，以產生一驅動電壓波形，其振幅可被精準校正，以經由一幫浦電容移動一預設數量的電荷至／自移相器3956c。驅動電路3966c被配置為移動一預設數量的電荷至／自移相器3956c，以控制由移相器3956c施加的對應光學相位移。

【0154】 移相器3956a、3956b及3956c的摻雜p+及n+區域長度分別為4L、2L及L。驅動電路4404a、4404b及4404c提供代表3位元數位輸入值的二元訊號至移相器3956a、3956b及3956c，該等移相器依照4:2:1的加權值比例，對在第一、第二及第三波導區段中傳播的光波施加光學相位移。例如，當一個數值為'1'的二元值被施加至移相器3956a及3956c時，移相器3956a所施加的光學相位移大小會是移相器3956c所施加的光學相位移大小的四倍。相似地，當一個數值為'1'的二元值被施加至移相器3956b及3956c時，移相器3956b所施加的光學相位移大小會是移相器3956c所施加的光學相位移大小的二倍。以此種方式，MZI 3950將該3位元數位輸入值轉換為一具有3位元精確度的類比輸出訊號，而不須使用數位-

類比轉換器電路；若使用第7圖中的MZI 3900，則可能需要使用數位-類比轉換器電路。由於高速數位-類比轉換器電路不易實施，故相較於使用MZI 3900，具有片段式設計的MZI 3950可使數位電訊號以更快速度被轉換為類比光學訊號。

【0155】 如上所述，在某些ANN運算範例中，例如使用批量處理技術時，調變器陣列144的重新配置速率可快於OMM單元150的重新配置速率。例如，調變器陣列144可使用多個具有片段式設計的Mach-Zehnder調變器3950來調變接收自雷射單元142的光波，以基於第一MC子單元132提供的已編碼輸入資料(例如數位輸入資料)提供一長度為N的光學輸入向量，且該光學輸入向量傳播至OMM單元150。由於OMM單元150的重新配置速率可能較慢，故在某些範例中該OMM單元150包括多個不使用片段式設計的Mach-Zehnder調變器3900。驅動MZI 3900的電路較驅動MZI 3950的多個區段的電路更為簡單。該OMM單元150可具有大量的MZI，故在OMM單元150中使用MZI 3900可減低該OMM單元150中驅動電路的複雜度。

【0156】 在某些實施中，光電處理器140被配置為進行需要OMM單元150快速更新的ANN運算，其更新速率必須可比擬於調變器陣列144的更新速率。在此種情形下，該OMM單元150亦可使用多個使用片段式設計的MZI 3950。

【0157】 在某些實施中，調變器陣列144包括多個不使用片段式設計的MZI 3900，且OMM單元150包括多個使用片段式設計的

MZI 3950。

【0158】 參見第10圖，在某些實施中，Mach-Zehnder調變器3950被使用在每一數位輸入具有二個位元的ANN系統中。在此範例中，臂3954a被配置為具有二個移相器，包括長度為 $2L$ 的第一移相器3956b及長度為 $L$ 的第二移相器3956c。

【0159】 參見第11圖，在某些實施中，Mach-Zehnder調變器3950被使用在每一數位輸入具有四個位元的ANN系統中。在此範例中，臂3954a被配置為具有四個移相器，包括長度為 $8L$ 的第一移相器3956d、長度為 $4L$ 的第二移相器3956a、長度為 $2L$ 的第三移相器3956b及長度為 $L$ 的第四移相器3956c。

【0160】 在某些實施中，每一數位輸入值具有 $N$ 個位元，且臂3954a被配置為具有一組 $N$ 個移相器，包括長度為 $2^{N-1}L$ 的第一移相器、長度為 $2^{N-2}L$ 的第二移相器、...、及長度為 $L$ 的第 $N$ 移相器。

【0161】 在第8圖至第11圖所示的範例中，該等移相器大致上排列在一直線上。在某些範例中，臂3954a中的波導可具有一個或多個彎折或屈曲，以縮短MZI 3950的整體長度。

【0162】 在某些實施中，具有片段式設計的MZI可在二臂(例如3954a及3954b)上皆具有移相器。第12圖為一範例MZI 3980的示意圖，其包括二臂的每一臂上各一組二個移相器。第13圖為一範例MZI 3990的示意圖，其包括二臂的每一臂上各一組三個移相器。第14圖為一範例MZI 3995的示意圖，其包括二臂的每一臂上各一組四個移相器。

【0163】 第15圖為一示意圖，圖示一電路範例，該電路驅動第13圖中MZI 3990的各個移相器，其中每一臂上各包括一組三個移相器。臂3964b包括三個移相器3956d、3956e及3956f，分別被配置為相似於3956a、3956b及3956c。移相器3956d、3956e及3956f分別被驅動電路3966d、3966e及3966f驅動。驅動電路3966d、3966e及3966f分別相似於3966a、3966b及3966c。對驅動電路3966a及3966d的輸入以推-拉(push-pull)方式被驅動，以造成移相器3956a及3956d發出互補的光學相位移。例如，若驅動電路3966a驅動移相器3956a，使移相器3956a對在臂3964a中傳播的光施加 $\theta$ 的相位移，則驅動電路3966d驅動移相器3956d使其對在臂3964b中傳播的光施加 $-\theta$ 的相位移。對驅動電路3966b及3966e的輸入以推-拉方式被驅動，以造成移相器3956b及3956e發出互補的光學相位移。相似地，對驅動電路3966c及3966f的輸入以推-拉方式被驅動，以造成移相器3956c及3956f發出互補的光學相位移。為圖示清晰明確起見，各驅動電路3966及移相器3956之間的詳細連接情形在圖中被略去不繪。

【0164】 在某些實施中，臂3954a中的移相器數量與每一數位輸入值中的位元數量不同。在此種情況中，該等二極體區段分別施加不同的調變貢獻至經由該光波導部分傳播的光波，以提供部分數位至類比轉換。其餘的電路可用於完成數位至類比轉換。

【0165】 參見第16圖，在某些實施中，Mach-Zehnder調變器4010被配置為將6位元數位電訊號轉換為具有6位元精確度的類

比光學訊號。除了控制電壓波形4404a、4404b及4404c分別由2位元數位-類比轉換器4012a、4012b及4012c(合稱為4012)提供以外，該Mach-Zehnder調變器4010與第9圖中的Mach-Zehnder調變器3950相似。為圖示清晰明確起見，各電荷幫浦頻寬增加電路與移相器之間的詳細連接情形在圖中被略去不繪。例如，使用相同的數位至類比轉換架構，2位元數位-類比轉換器(DAC)的運作可快於6位元DAC。因此，使用2位元DAC 4012驅動具有三個移相器3956的MZI 4010的ANN系統，其運作可快於使用6位元DAC驅動不具有片段式設計的MZI 3900。在一臂上具有一組六個移相器(每一移相器以一對應驅動電路驅動)的MZI，其長度大於具有一組三個移相器的MZI。因此，使用2位元DAC 4012驅動具有三個移相器3956的MZI 4010的ANN系統，其長度可短於使用二元訊號驅動在一臂上具有一組六個移相器的MZI的ANN系統。

**【0166】** 一般而言，一個需要將N位元數位電訊號轉換為具有N位元精確度類比光學訊號的模組，可使用p位元DAC驅動在一臂上具有一組q個移相器的MZI，其中 $p \times q = N$ 。數值p及q的選擇依MZI所需的重新配置速度以及可容納該MZI的移相器的可用空間大小而定。若p越小則重新配置速度越快，而若q越小則MZI長度越短。

**【0167】** 在某些實施中，該等半導體二極體運作於順向偏壓狀態，以利用載子注入的折射率調變(index modulation)效應，其可使用相對較短的光徑長(例如小於約0.1公釐、或小於約0.5公釐、或小於約0.1公釐)實施。此等較短的光徑長使調變器得以小巧地佈

局於使用多個MZI或其他種類調變器的積體電路光學裝置內。

【0168】除了MZI 3950等干涉儀光學調變器之外，非干涉儀光學調變器亦可用於實施片段式設計，以用於數位至類比轉換。例如，吸收光學調變器可取代移相器沿著單一光波導用於MZI的一臂或多臂。片段式設計同樣促進訊號調節的使用以增加頻寬，例如預加重及／或去加重，其可獨立實施於各區段上。

【0169】第17圖為時序圖，圖示對圖3中的電荷幫浦頻寬增加電路4416進行的預加重及去加重。在某些實施中，反相器電路4405被輸入資料(圖1700所示的波形4404)驅動。電容 $C_p$  4402的底板(bottom plate)會跟隨反相器4405的輸出，即驅動電壓波形4406(如圖1702所示)，其位準介於0伏特至 $V_{CP}$ 之間。隨著波形4406的改變，驅動電壓波形4406會將電容 $C_p$  4402內的電荷推或拉，以調變該二極體。電容 $C_p$  4402的頂板(top plate)電壓如圖1704所示。電容 $C_p$  4402的頂板電壓波形可在 $VDD_{IO}-V_{on}+V_{CP}$ 至 $VDD_{IO}-V_{on}-V_{CP}$ 之間振盪，其峰值與谷值可明顯高於或低於僅由電流模式DAC或電流源4412驅動時的峰值與谷值。 $V_{on}$ 為該二極體的啟動電壓(turn-on voltage)。如圖1704所示，用於控制自幫浦電容4402打入或拉出調變器電路4400電荷數量的控制電壓波形4404(第3、9、16圖)被預加重或去加重，以快速移入或移出所需數量的電荷至／自調變器電路4400。

【0170】「預加重」一詞指前述動作中電荷幫浦電路4416經由電容 $C_p$  4402快速將電荷打入調變器電路4400的部分，使電容 $C_p$



4402的頂板波形快速上升(例如1706)至一高於穩態電壓的位準。

「去加重」一詞指前述動作中電荷幫浦電路4416經由電容 $C_p$  4402快速將電荷移出調變器電路4400的部分，使電容 $C_p$  4402的頂板波形快速下降(例如1708)至一低於穩態電壓的位準。

【0171】 相較於使用電壓驅動的習知預加重電路，電荷幫浦頻寬增加電路4416具有多項優點。例如，某些習知預加重電路僅能進行預加重，而電荷幫浦頻寬增加電路4416可進行預加重與去加重。例如，某些使用電壓驅動的習知預加重電路需要從外加電壓源取得明顯較高的電壓，並以該供應電壓一半的電壓值對該調變器施加偏壓、或需要複雜的電壓升高(voltage boost)電路。相較之下，電荷幫浦頻寬增加電路4416可使用電壓較低的電壓源，且不需要複雜的電壓升高電路。此外，由於習知預加重電路為電壓驅動，為確保該調變器在目標相位不被驅動，該習知電路可能需要實施額外的控制相位，以停止該加重電路。相較之下，電荷幫浦頻寬增加電路4416可移動精確數量的電荷自／至電容 $C_p$  4402，並可準確控制外加至該調變器的電壓，因而不需要實施額外的控制相位，以停止該加重電路。

【0172】 第54圖圖示一環形諧振器(ring resonator)調變器5400的範例，其具有片段式設計。環形諧振器調變器5400包括第一光波導5402a、第二光波導5402b、及一個封閉迴圈光波導5402c。二個移相器被提供，包括第一移相器5404a及第二移相器5404b，以調變在封閉迴圈光波導5402c中傳播的光波。該第一及

第二移相器5404a及5404b的長度不同。在此範例中，第二移相器5404b的長度為第一移相器5404a的二倍。移相器5404a及5404b分別對在與移相器5404a及5404b關聯的光波導部分中傳播的光波施加不同的調變貢獻，以提供適當的數位至類比轉換。環形諧振器調變器5400包括二個移相器，於下文中將以「二段環形諧振器調變器」稱之。

【0173】 例如，一個從埠A進入光波導5402a的輸入光波可傳播至光波導5402a的埠B，或經由環形波導5402c耦接於光波導5402b的埠C。由移相器5404a及5404b對在環形波導5402c內傳播的光波所施加的調變，會調變在光波導5402a的埠B處的光波振幅。該二移相器5404a及5404b可有效地進行2位元數位至類比轉換。

【0174】 例如，第一移相器5404a被第一電荷幫浦頻寬增加電路5406a驅動，且第二移相器5404b被第二電荷幫浦頻寬增加電路5406b驅動。該等電荷幫浦頻寬增加電路5406a及5406b與第3圖所示的電荷幫浦頻寬增加電路相似。為圖示清晰明確起見，某些對電荷幫浦頻寬增加電路5406a及5406b的訊號連接在圖中被略去不繪。

【0175】 例如，第一電荷幫浦頻寬增加電路5406a被2位元DAC 5408a驅動，且第二電荷幫浦頻寬增加電路5406b被2位元DAC 5408b驅動。對2位元DAC 5408a及5408b與二段環形諧振器調變器5400的組合使用，使4位元數位輸入訊號得以被轉換為具有4

位元精確度的類比光學訊號。

【0176】 在某些範例中，有 $n$ 個移相器對在環形波導5402c中傳播的光波進行調變，此時該調變器於下文中將以「 $n$ 段環形諧振器調變器」稱之。若其中每一移相器各被由一 $m$ 位元DAC( $m \geq 1$ )依序驅動的電荷幫浦頻寬增加電路所驅動，則該等 $m$ 位元DAC及該 $n$ 段環形諧振器調變器的組合可將一 $m \times n$ 位元數位輸入訊號轉換為一具有 $m \times n$ 位元精確度的類比光學訊號。一般而言，若 $m$ 越小，則該 $m$ 位元DAC運作越快，且該環形諧振器調變器被重新配置的速度越快。

【0177】 在某些實施中，環形諧振器調變器5400可被用於第1圖與第6圖中的調變器陣列144，以及第39圖與第51圖中的調變器陣列3208。在某些實施中，環形諧振器調變器5400亦可用於第1圖與第6圖中的OMM單元150，以及第39圖與第51圖中的OMM單元3520。該 $m$ 位元DAC的數值 $m$ 及該 $n$ 段環形諧振器調變器的數值 $n$ 可基於數種基準選取，例如所欲的調變器陣列及OMM單元重新配置頻率，以及驅動該等移相器的電路複雜度。

【0178】 在某些實施中，在由電DAC訊號驅動的非片段式設計光學調變器中，干涉儀調變器中的單一移相器亦可利用訊號調節達成頻寬增加。例如，若該干涉儀調變器為環形諧振器(例如第29圖中的環形諧振器2222)，則該環較小的體積可能導致空間不足以容納多個長度合適的區段。環形諧振器可作為例如調變器，以提供波長選擇性，而不需增加在其他種類的調變器中需使用的額外光學

多工器與解多工器。

【0179】 當脈衝振幅調變(pulse amplitude modulation, PAM)具有多於二個等級時(即具有多於2位元的數位值),在非片段式設計中的訊號調節可能較片段式設計中的訊號調節更為複雜。在干涉儀調變器中(例如第7圖中的MZI調變器),該調變器的光學干涉部分(例如MZI調變器3900的耦合器3902b)提供某程度的光學相消干涉,基於移相器(例如第7圖中的3906)的折射率調變導致振幅以一預設幅度減低。驅動該移相器的電DAC訊號可使用形塑振幅改變(例如對初始振幅使用預加重,及/或對拖後振幅使用去加重)的電路處理之,以回應該一系列數位輸入值中連續數位輸入值之間對應的改變。在非片段式設計中,在四個或更多等級之間切換的預加重/去加重具有較為複雜的形式,而不像在二個等級之間切換時可使用簡單的預加重/去加重方式。

【0180】 在某些實施中,當映射不同調變器輸入至該調變器的不同振幅減低結果時,非線性的結果可能在該調變器中發生。現有技術可補償此一非線性情形,然而該非線性補償程序可能相對較慢,及/或消耗相對大量的功率。較快速且功率效率較佳的非線性補償預加重/去加重訊號調節技術可在形成驅動干涉儀調變器中的單一移相器的電訊號時,藉由合併不同訊號調節路徑而達成。一個序列的輸入值中一給定數量的數個位元(例如n個位元)、或平行的n位元值,可用於控制 $2^n$ 個單一等級的DAC中的每一個DAC。例如,該 $2^n$ 個單一等級的DAC可包含於第一MC子單元132(若該等具有

片段式設計的MZI用於調變器陣列144)、第二MC子單元134(若該等具有片段式設計的MZI用於OMM單元150)或二者(若該等具有片段式設計的MZI用於調變器陣列144及OMM單元150二者)。其中每一單一等級DAC被配置以提供振幅為該 $2^n$ 位元數值中之一的電訊號，及對應該振幅的預加重與去加重，該等預加重及去加重係針對該調變器於該振幅下的一給定非線性情形進行適當的調節。接著，提供調變器輸入值的電訊號由該等已調節單一等級DAC輸出中合適者選取。

【0181】 例如，從提供一給定調變器輸入值的該等單一等級DAC之一出發的一第一訊號調節路徑，可被配置以提供一未調節電訊號，對應於驅動該DAC的一系列數位輸入值，其中對一給定種類的DAC而言(例如電流導向式(current-steering)DAC)，在該調變器輸入值下，該輸出可基於該調變器已知的非線性情形被適當地縮放。一第二訊號調節路徑可被配置，以提供該未調節電訊號的一延遲、縮放及／或反相版本(以提供預加重)。一第三訊號調節路徑可被配置，以提供該未調節電訊號的一延遲、縮放及／或反相版本(以提供去加重)。若有需要，當該未調節電訊號的不同版本被加入至該未調節電訊號時，可使用任何數量的額外訊號調節路徑，以提供適當數量的預加重及／或去加重。該等已被縮放以補償非線性情形、且已被調節以提供適當數量的預加重及去加重的所得電訊號，可接著被用作調變器輸入值，以得出已等化(equalized)且已增加頻寬的光學訊號，該等光學訊號具有不同光學振幅，平均分配在四個或更

多使用的等級中。

【0182】 第18圖為一圖表3910，顯示使用第7圖所示之配置的Mach-Zehnder調變器3900在1530奈米、1550奈米及1570奈米波長下的強度-電壓曲線。圖表3910顯示Mach-Zehnder調變器3900在1530奈米至1570奈米的範圍內，於不同波長下具有相似的強度-電壓特徵。

【0183】 參見第6圖，波長分波多工(WDM)ANN運算系統104中的調變器陣列144包括多組光學調變器，被配置以產生多個光學輸入向量，其中每一組光學調變器對應至該等波長中之一，並產生具有個別波長的個別光學輸入向量。例如，對包含長度為32並具有三個波長(例如 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ )的光學輸入向量的系統而言，調變器陣列144可具有三組調變器，每組有32個。更進一步地，調變器陣列144亦包括一光學多工器，被配置以將該等光學輸入向量合併為一包括該等波長的合併光學輸入向量。例如，該光學多工器可對該光學輸入向量中每一元素將該三組調變器三個不同波長的輸出合併為單一傳播通道，例如一波導。因此，回到前述範例，該合併光學輸入向量將具有32個光學訊號，其中每一訊號包含三個波長。

【0184】 此外，WDM ANN運算系統104中的類比電子單元146更被配置以對該等波長進行解多工，並產生多個解多工輸出電壓。例如，類比電子單元146可包括一解多工器，被配置以對該多波長光學輸入向量中的32個訊號中每一訊號包含的三個波長進行解多工，並將該三個單一波長光學輸出向量路由至耦接於三組轉阻

放大器的三組光感測器。

**【0185】** 此外，WDM ANN運算系統104中的ADC單元160包括多組ADC，被配置以轉換類比電子單元146的該等解多工輸出電壓。其中每一組ADC對應至該等波長中之一，並產生個別的數位化解多工光學輸出。例如，該多組ADC可耦接至類比電子單元146的該多組轉阻放大器。

**【0186】** 控制器110可實施一方法，類似於程序200但予以擴充，以支援多波長運作。例如，該方法可包括自ADC單元160獲取多個數位化解多工光學輸出的步驟，其中每一第一數位輸出向量對應至該等波長中之一；對每一第一數位輸出向量進行非線性轉換，以產生多個轉換第一數位輸出向量；並將該等轉換第一數位輸出向量儲存於該記憶單元。

**【0187】** 在某些範例中，該ANN可特別設計，且該等數位輸入向量可特別形成，以使該多波長光學輸出向量不需進行解多工即可被偵測。在此等範例中，類比電子單元146可為一波長不敏感偵測單元，其並不解多工該多波長光學輸出向量的多個波長。因此，類比電子單元146的各個光感測器可高效地將一光學訊號中的該等波長加總為單一光電流(photocurrent)，且由類比電子單元146輸出的每一電壓皆對應該等數位輸入向量矩陣乘法結果的一個逐個元素和(element-by-element sum)。

**【0188】** 上文中，作為ANN運算一部分的加權和非線性轉換皆由控制器110在數位領域進行。在某些範例中，該等非線性轉換

可能為運算密集(computationally intensive)或需消耗大量功率、明顯增加控制器110的複雜度、或在產出量或功率效率方面使ANN運算系統100或104的效能受限。因此，在ANN運算系統100或104的某些實施中，該非線性轉換可經由類比電子元件在類比領域進行。

【0189】 在某些實施中，類比電子單元146被配置以運行一非線性轉換函數，並輸出轉換輸出電壓至ADC單元160。當ADC單元160接收已由類比電子單元146進行非線性轉換的電壓後，控制器110可自ADC單元160獲取轉換數位化輸出電壓，對應於該等轉換輸出電壓。由於自ADC單元160獲取的該等數位化輸出電壓已被非線性轉換(「啟用」)，故控制器110的非線性轉換步驟可省略，降低了控制器110的運算負擔。接著，自ADC單元160直接獲取的第一轉換電壓可作為第一轉換數位輸出向量儲存於記憶單元120中。

【0190】 由類比電子單元146進行的類比電子非線性轉換可以多種方式實施。例如具有回授(feedback)配置的高增益放大器(high-gain amplifier)、具有可調整參考電壓的比較器(comparator)、二極體的非線性電流-電壓特徵、二極體的崩潰(breakdown)特徵、可變電容的非線性電容-電壓特徵、或可變電阻的非線性電流-電壓特徵等皆可使用。

【0191】 使用類比非線性轉換可藉由減少數位領域需進行的步驟數量，提升ANN運算系統104的效能，例如產出量或功率效率。將非線性轉換步驟移出數位領域，可提升ANN運算系統運作中



的彈性，並改進效能。例如，在循環神經網路中，OMM單元150的輸出被啟用，並回授至OMM單元150的輸入端。在由ANN運算系統100中的控制器110進行啟用的範例中，必須在每一次通過OMM單元150時皆對感測單元146的輸出電壓進行數位化。在啟用動作先於ADC單元160的數位化動作的範例中，可減少進行循環神經網路運算時所需ADC轉換的數量。

**【0192】** 在某些實施中，類比非線性轉換可由ADC單元160進行。例如，一非線性ADC單元可為一具有非線性查找表的線性ADC單元，其中該查找表將該線性ADC單元的線性數位化輸出映射至所欲的非線性轉換數位化輸出。

**【0193】** 第1圖中的ANN運算系統100的光電處理器140的某些實施包括一雷射單元142，產生N個光輸出，其中該等光輸出具有相同波長及光學同調性(coherent)。在該等實施中，光學矩陣乘法單元150在光學領域進行NxN矩陣乘法運算，其中該等光學訊號自OMM單元150的輸入端至OMM單元150的輸出端皆維持同調性。OMM單元150在光學領域進行矩陣乘法的優點如前文所述。在其他實施中，OMM單元150在進行矩陣運算時可處理非同調或低度同調的光學訊號。下文將敘述光學訊號不需要在整個矩陣乘法過程中皆維持同調性的光電運算系統，其中該等運算的某些部分在光學領域進行、某些部分在電領域進行。

**【0194】** 該光電運算系統可使用不同種類的操作產生一運算結果，其中每一操作在對該操作的物理原理而言最合適(例如就能源

消耗及／或速度而言)的訊號(例如電訊號或光學訊號)上進行。例如，複製運算可使用光學的功率分配(power splitting)進行、加法運算可使用電的電流加總進行、乘法運算可使用光學的振幅調變進行。一個使用上述三種操作進行的運算範例為將一矩陣乘以一向量(例如人工神經網路運算所採用者)。多種其他運算亦可使用上述操作進行，該等運算代表一個廣義線性操作的集合，由該集合可進行多種運算，包括但不限於：向量-向量內積、向量-向量逐項相乘、向量-純量逐項相乘、矩陣-矩陣逐項相乘等。

【0195】參見第19圖，一個光電運算系統1800的範例包括一組光埠或光源1802A、1802B等，提供光學訊號。例如，在某些實施中，光埠／光源1802A可包括一光學輸入耦合器，提供一耦接至光徑1803的光學訊號。在其他實施中，光埠／光源1802A可包括已調變光源，例如雷射(可用於例如對同調性敏感的實施)或發光二極體(light-emitting diode, LED)(可用於例如對同調性不敏感的實施)，該已調變光源產生一耦接至光徑1803的光學訊號。某些實施可包括多個埠的集合，該等埠將多個光學訊號耦接至系統1800及在該系統1800內產生光學訊號的光源。該等光學訊號可包括任何光波(例如光譜包括約100奈米至約1毫米波長範圍的電磁波)，其中該光波攜帶訊息且已被或正被調變，該調變可以多種調變形式中任一種進行。光徑1803可基於例如光波導的引導模式(例如內嵌於光子積體電路(PIC)內的波導、或光纖)或基於光埠／光源1802A與系統1800中另一模組之間的一預設自由空間路徑(free-space path)而

定義。

【0196】 在某些實施中，光電運算系統1800被配置以對一輸入值陣列進行運算，該等輸入值在光埠或光源1802A、1802B等所提供的個別光學訊號上進行編碼。例如，對多種基於神經網路的機器學習應用而言，該運算可實施向量-矩陣乘法(或矩陣乘以向量的乘法)，其中一輸入向量由一矩陣與其相乘，以產生一輸出向量作為運算結果。該等光學訊號可代表一向量中的元素，可能僅包括由該向量中選定元素形成的子集合。例如，對某些神經網路模型而言，該運算中所使用的矩陣大小可大於硬體系統(例如一更大系統中的一引擎或一輔助處理器)中可載入的矩陣大小，其中該硬體系統進行該運算中的向量-矩陣乘法部分。因此，進行該運算的一部分可包括將該矩陣及該向量劃分為多個較小區段，使該等區段可分別提供至該硬體系統。

【0197】 第19圖中所示的模組可為一更大系統的一部分，該更大系統對一相對較大的矩陣(或子矩陣)進行向量-矩陣乘法，例如 $64 \times 64$ 矩陣。然而，為圖示方便起見，該等模組將在一範例運算之情境下進行敘述，該範例運算使用 $2 \times 2$ 矩陣進行向量-矩陣乘法。本範例所提及之模組包括二個複製模組1804A及1804B、四個乘法模組1806A、1806B、1806C及1806D、及二個加法模組，其中僅一個加法模組1808顯示於第19圖中。此等模組使矩陣 $\bar{M} = \begin{bmatrix} M_A & M_B \\ M_C & M_D \end{bmatrix}$ 乘以輸入向量 $\bar{x} = \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix}$ 的運算得以產生輸出向量 $\bar{y} = \begin{bmatrix} y_A \\ y_B \end{bmatrix}$ 。對此一向量-矩陣乘法運算 $\bar{y} = \bar{M} \bar{x}$ 而言，輸出向量 $\bar{y}$ 的二個元素中的每一元素可以

不同的等式表示，如下。

$$y_A = M_A x_A + M_B x_B \quad (\text{等式 1})$$

$$y_B = M_C x_A + M_D x_B \quad (\text{等式 2})$$

【0198】 等式1及等式2可分解為多個可於系統1800中進行的單獨步驟，其使用一組基本運算：複製運算、乘法運算及加法運算。在該些等式中，該輸入向量的每一元素出現二次，故需要進行二次複製運算。另須進行四次乘法運算及二次加法運算。對使用較大矩陣實施向量-矩陣乘法的系統而言，所進行的運算數量將較大，且當使用非正方形(即列數與欄數不同)矩陣時，每一運算的參數相對數量將不同。

【0199】 在此範例中，該等複製運算由複製模組1804A及1804B進行。該輸入向量的元素 $x_A$ 及 $x_B$ 分別由來自光埠／光源1802A及1802B的光學訊號上編碼的數值代表。該等數值中每一個皆在二個等式中使用，故每一數值皆被複製，以提供二個複本至不同的個別乘法模組。一數值可在一特定時段中，使用例如已被調變而功率為一功率等級集合中之一的光波，或工作週期(duty cycle)為一工作週期集合中之一的光波，對該數值進行編碼，如下文所述。經由複製一數值編碼所在的光學訊號，可複製該數值。以代表元素 $x_A$ 的數值編碼的光學訊號由複製模組1804A所複製，而以代表元素 $x_B$ 的數值編碼的光學訊號由複製模組1804B所複製。每一複製模組皆可使用例如光學功率分配器實施，例如以波導模態(guided mode)耦接一輸入波導至二個輸出波導的波導光分配器，其經由一

Y形分配器將功率逐漸(例如絕熱(adiabatically))分配、或使用一層或多層介電介面或薄膜的自由空間分光器(beam splitter)，以自一輸入光束分別傳送及反射二個輸出光束。

【0200】 在本說明書中，所謂「以代表元素 $x_A$ 的數值編碼的光學訊號由複製模組1804A所複製」，係指代表元素 $x_A$ 的多個訊號複本乃基於該輸入訊號產生，而不必然指複製模組1804A的該等輸出訊號具有與該輸入訊號相同的振幅。例如，若複製模組1804A將輸入訊號功率平均分配於二個輸出訊號之間，則該二輸出訊號中每一個的功率皆等於或小於該輸入訊號的50%。該二輸出訊號為彼此之複本，然而複製模組1804A每一輸出訊號的振幅皆與該輸入訊號的振幅不同。此外，在某些具有一群多個複製模組，用於複製一給定光學訊號、或多個光學訊號之子集合的實施例中，每一個別複製模組並不必然在其所產生的各複本之間平均分配功率，然而該群複製模組可被集體配置，以提供大致上具有相等功率的多個複本至下游模組(例如下游乘法模組)的輸入端。

【0201】 在此範例中，該等乘法運算由四個乘法模組1806A、1806B、1806C及1806D進行。對該等光學訊號之一的每一複本而言，其中一個乘法模組將該光學訊號複本以一矩陣元素值相乘，此動作可使用光學振幅調變進行。例如，乘法模組1806A將輸入向量元素 $x_A$ 以矩陣元素 $M_A$ 相乘。該向量元素 $x_A$ 的數值可在光學訊號上編碼，而該矩陣元素 $M_A$ 的數值可以光學振幅調變器的振幅調變等級的形式編碼。

【0202】 以向量元素  $x_A$  編碼的光學訊號可使用不同形式的振幅調變予以編碼。該光學訊號的振幅可對應於一實體光波在一特定時段內的一特定瞬間功率等級  $P_A$ ，或可對應於一實體光波在一特定時段中的一特定能量  $E_A$  (其中功率對時間的積分等於總能量)。例如，一雷射光源的功率可被調變以具有一特定功率等級，該功率等級為一預設集合的多個功率等級中之一。在某些實施中，可將電子電路在接近一最佳化操作點下進行操作，因此對被調變為「開」與「關」(零功率)的訊號可在一時段中的某些部分使用一最佳化「開」功率等級，而不需將功率在多種可能功率等級中變化。功率處於「開」等級的時間長度對應於一特定能量等級。此特定功率或能量值可映射至該元素  $x_A$  的一特定值(使用線性或非線性映射關係)。功率對時間的實際積分值可於訊號進入電領域後在系統 1800 的下游處計算而得，以得出一特定總能量等級，如下文所述。

【0203】 此外，「振幅」一詞可指訊號的大小，以光波的瞬間或積分功率代表，或亦可等效地指光波的「電磁場振幅」。此係由於電磁場振幅與訊號振幅具有明確定義的關係(例如經由將電磁場強度對波導模態或自由空間光束的橫向大小進行積分以得出瞬間功率，其中電磁場強度與電磁場振幅的平方成正比)。由此一定義可得出調變值之間的關係，因一個對電磁場振幅以一特定值  $\sqrt{M}$  調變的調變器亦可被視為將基於功率的訊號振幅以一對應值  $M$  調變(因光功率與電磁場振幅的平方成正比)。

【0204】 由乘法模組用於編碼矩陣元素  $M_A$  的光學振幅調變

器，可經由使用任一種物理交互作用改變該光學訊號的振幅(即該光學訊號的功率)而運作。例如，該調變器可包括環形諧振器、電吸收調變器、熱電光調變器或Mach-Zehnder干涉儀(MZI)調變器。在某些技術中，一部分功率作為物理交互作用的一部分被吸收，而在其他技術中，功率被物理交互作用轉移，其中該物理交互作用改變該光波不同於功率的其他特性(例如偏振或相位)，或將光功率的耦合情形在不同光學結構之間改變(例如使用可調式諧振器)。對在行經不同路徑的光波之間使用干涉(例如相消干涉及／或相長干涉)原理運作的光學振幅調變器而言，可使用同調光源，例如雷射。對使用吸收原理運作的光學振幅調變器而言，可使用同調、非同調或低度同調的光源，例如LED。

**【0205】** 在一個波導1×2光學振幅調變器的範例中，使用一相位調變器，經由將該相位調變器配置於該調變器的其中一波導中，以調變一光波的功率。例如，該波導1×2光學振幅調變器可將由一輸入光波導引導的一光波分配為第一臂及第二臂。該第一臂包括一移相器，該移相器施加一相對相位移，對應於該第二臂的相位延遲。接著，該調變器合併來自第一臂及第二臂的光波。在某些實施例中，不同的相位延遲值經由相長干涉或相消干涉，對由該輸入光波導引導的光波功率提供一介於0至1之間的乘數。在某些實施例中，該第一臂及第二臂被合併為二個輸出波導中的各個輸出波導，且分別自該二輸出波導接收光波的個別光感測器所產生的光電流差值提供一有號乘法結果(例如乘以一介於-1至1之間的數值)，如下文所述(參

見第28圖)。藉由對該等已編碼光學訊號選擇合適的振幅縮放，該矩陣的元素值範圍可映射至一任意範圍的正值(0至M)或有號值(-M至M)。

【0206】 在此範例中，加法運算由二個加法模組進行，其中第19圖所示的加法模組1808用於進行等式2的加法運算，以計算輸出向量元素 $y_B$ 。一對應加法模組(未圖示)用於進行等式1的加法運算，以計算輸出向量元素 $y_A$ 。加法模組1808產生一電訊號，代表二個乘法模組1806C及1806D運算結果的和。在此範例中，該電訊號以一電流 $i_{sum}$ 形式呈現，該電流與分別由乘法模組1806C及1806D產生的輸出光學訊號功率的和成正比。在某些實施例中，產生此一電流 $i_{sum}$ 的加法運算於光電領域進行，而在其他實施例中於電領域進行。或者，某些實施例可對某些加法模組使用光電領域加法，並對其他加法模組使用電領域加法。

【0207】 在電領域進行加法的實施例中，加法模組1808可以下列裝置實施：(1)二個或更多輸入導體，其中每一導體攜帶一輸入電流，該電流的振幅代表其中一個乘法模組的運算結果，以及(2)至少一個輸出導體，攜帶一電流，該電流為該等輸入電流之總和。例如，上述配置可在該等導體為在一接面交會的導線的情形下達成。此一關係可以例如Kirchhoff電流定律等形式(然不受限於理論)理解，其中Kirchhoff電流定律陳述了流入一接面的電流等於流出該接面的電流。對此等實施例而言，向加法模組1808提供的訊號1810A及1810B為輸入電流，該等輸入電流可由光感測器產生，其



中該等光感測器為產生個別光電流的乘法模組的一部分，其中該光電流的振幅與接收的光學訊號的功率成正比。加法模組1808接著提供輸出電流 $i_{sum}$ 。接著，該輸出電流的瞬間值或積分值可用於代表該總和的量值。

【0208】在光電領域進行加法的實施例中，加法模組1808可使用光感測器實施(例如光電二極體(photodiode))，該光感測器接收由不同的個別乘法模組產生的光學訊號。對此等實施例而言，向加法模組1808提供的訊號1810A及1810B為輸入光學訊號，每一訊號皆包括一光波，該光波的功率代表其中一個乘法模組的運算結果。此範例中的輸出電流 $i_{sum}$ 為該光感測器產生的光電流。由於該等光波的波長不同(例如其差異足夠大，使彼此之間無明顯相長或相消干涉產生)，故該光電流將與該等接收到的光學訊號的功率總和成正比。該光電流亦大致上等於可造成各等效單獨光感測器偵測到的個別光功率的個別電流的總和。該等光波的波長不同但足夠接近，以使該光感測器的反應大致上相同(例如在該光感測器一大致平坦的感測頻寬內的波長)。如上文所述，電領域的加法運算使用電流加總，可避免對多波長的需求，而使系統架構更為簡單。

【0209】第20圖為一系統配置1900的範例，顯示該系統使用 $2 \times 2$ 矩陣進行向量-矩陣乘法的一實施，其中加法運算於電領域進行。在此範例中，輸入向量為 $\vec{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$ ，矩陣為 $\vec{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ 。該輸入向量的每一元素被編碼在不同的光學訊號上。二個不同的複製模組1902a及1902b(統稱為1902)進行光學複製運算，以將該運算分

配至不同路徑(例如一「上方」路徑及一「下方」路徑，其中「上方」及「下方」二詞指圖中該等路徑的相對位置)。四個乘法模組1904a、1904b、1904c及1904d(統稱為1904)中，每一個皆使用光學振幅調變將輸入向量元素與不同矩陣元素相乘。在每一乘法模組1904的輸出端，一光感測模組1906(例如1906a、1906b、1906c、1906d)將光學訊號轉換為電流形式的電訊號。不同輸入向量元素的二個上方路徑(例如包括1906a及1906c的輸出)以一加法模組1908a合併，而不同輸入向量元素的二個下方路徑(包括1906b及1906d的輸出)以一加法模組1908b合併。加法模組1908a及1908b(統稱為1908)於電領域進行加法運算。因此，輸出向量的每一元素被編碼在不同的電訊號上。如第20圖所示，隨著運算進行，輸出向量的各部分逐漸產生，以分別自該上方路徑及下方路徑得出下列結果。

$$M_{11}v_1 + M_{12}v_2$$

$$M_{21}v_1 + M_{22}v_2$$

【0210】 在該系統的不同部分中，不同的光功率可代表相同的數值。例如，複製模組1902a接收輸入波導1914上的一輸入訊號，並提供輸出訊號至輸出波導1916a及1916b。輸出波導1916a或1916b上的光學訊號振幅代表數值 $v_1$ ，其振幅約為輸入波導1914中光學訊號振幅(亦代表數值 $v_1$ )的一半。

【0211】 在某些實施中，若一複製模組進行一光學複製運算以將運算分配至三個路徑，則該光分配器輸出波導中代表一特定數值的光學訊號的振幅約為該輸入波導中光學訊號振幅(亦代表該特

定數值)的三分之一。相似地，若一複製模組進行一光學複製運算以將運算分配至四個路徑，則該光分配器輸出波導中代表一特定數值的光學訊號的振幅約為該輸入波導中光學訊號振幅(亦代表該特定數值)的四分之一，以此類推。

**【0212】** 在某些實施中，一光子積體電路包括不同種類的複製模組，例如一第一複製模組，進行光學複製運算以將運算分配至二個路徑、一第二複製模組，進行光學複製運算以將運算分配至三個路徑、一第三複製模組，進行光學複製運算以將運算分配至四個路徑、及一第四複製模組，進行光學複製運算以將運算分配至八個路徑。自該第一、第二、第三及第四複製模組的輸出所取得的訊號在合併之前會先進行縮放。

**【0213】** 例如，假設 $V_{out1}$ 為一使用 $2 \times 2$ 矩陣的向量-矩陣乘法運算所得的向量值，其中在光學複製運算中使用1對2分配器，而 $V_{out2}$ 為一使用 $4 \times 4$ 矩陣的向量-矩陣乘法運算所得的向量值，其中在光學複製運算中使用1對4分配器。若該光子積體電路被配置以使 $V_{out1}$ 與 $V_{out2}$ 合併，則 $V_{out2}$ 在與 $V_{out1}$ 合併前將被縮放至原 $V_{out2}$ 二倍的值。

**【0214】** 系統配置1900可使用多種光電技術中任何一種實施。在某些實施中，一共同基板(例如半導體，例如矽)可同時支援積體光學部件及電子部件。該等光徑可使用將較高折射率材料以較低折射率材料圍繞的波導結構實施，該波導結構定義一波導，以傳播攜帶光學訊號的光波。該等電路徑可以導體材料實施，以傳播攜

帶電訊號的電流。在第20至22圖及第25至38圖中，除非另有指稱，否則代表路徑的線段粗細度乃用於區分光徑(以粗線表示)及電路徑(以細線或虛線表示)。光分配器及光學振幅調變器等光學裝置，與光感測器及運算放大器(op-amp)等電學裝置，可在一共同基板上製造。或者，具有不同基板的不同裝置可用於實施該系統的不同部分，且該等裝置可經由通訊通道互相通訊。例如，光纖可提供通訊通道以在多個用於實施整體系統的裝置之間傳送光學訊號。該等光學訊號可代表進行向量-矩陣乘法時所提供的一輸入向量的不同子集合，及／或進行向量-矩陣乘法時所算出的中間結果的不同子集合，如下文所述。

【0215】 在本說明書中，圖式中可能顯示一光波導跨越一電訊號線，應注意，此時該光波導並不與該電訊號線相交。該電訊號線及該光波導可佈設於該裝置的不同層中。

【0216】 第21圖為一系統配置1920的範例，顯示該系統使用 $2 \times 2$ 矩陣進行向量-矩陣乘法的一實施，其中加法運算於光電領域進行。在此範例中，不同的輸入向量元素使用二個不同的個別波長 $\lambda_1$ 及 $\lambda_2$ 被編碼在光學訊號上。乘法模組1904a及1904c的光學輸出訊號在光學結合器模組1910a中合併，而乘法模組1904b及1904d的光學輸出訊號在光學結合器模組1910b中合併。光波導1914a將波長 $\lambda_1$ 及 $\lambda_2$ 的光學訊號自光學結合器模組1910a引導至光電加法模組1912a。相似地，光波導1914b將波長 $\lambda_1$ 及 $\lambda_2$ 的光學訊號自光學結合器模組1910b引導至光電加法模組1912b。光電加法模組1912a

及1912b可使用光感測器實施，如第20圖範例中的光感測模組1906一般。在此範例中，該總和以光電流代表，其中該光電流代表二個波長下的功率，而非以離開不同導體之間的接面的電流代表。

【0217】 在本說明書中，若圖式顯示二個光波導相互交叉，則該二光波導實際上是否相互光學耦接可由說明書敘述中得知。例如，自裝置頂部觀之，看似相交的二個波導，可能實施在不同層，因而並不相交。例如，在第21圖中，提供光學訊號 $\lambda_2$ 至複製模組1902b輸入端的光徑、及自乘法模組1904a提供光學訊號 $M_{11}V_1$ 至光學結合器模組1910a的光徑，彼此並不光學耦接，即使圖中看似相互交叉。相似地，自複製模組1902b提供光學訊號 $\lambda_2$ 至乘法模組1904d輸入端的光徑、及自乘法模組1904b提供光學訊號 $M_{21}V_1$ 至光學結合器模組1910b的光徑，彼此並不光學耦接，即使圖中看似相互交叉。

【0218】 第20圖及第21圖中顯示的系統配置可延伸以實施使用 $m \times n$ 矩陣進行向量-矩陣乘法的系統配置。在此範例中，輸入向量

為 $\vec{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$ ，而矩陣為 $\vec{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & \cdots & M_{mn} \end{bmatrix}$ 。例如，輸入向量元素 $v_1$

至 $v_n$ 由 $n$ 個波導提供，且每一輸入向量元素由一個或多個複製模組處理，以提供該輸入向量元素的 $m$ 個複本至 $m$ 個個別的路徑。共有 $m \times n$ 個乘法模組，每一個乘法模組使用光學振幅調變將輸入向量元素與不同的矩陣元素相乘，以產生代表 $M_{ij} \cdot v_j$  ( $i = 1 \dots m, j = 1 \dots n$ )的一電訊號或光學訊號。代表 $M_{ij} \cdot v_j$  ( $j = 1 \dots n$ )的各訊號以一第 $i$ 加法模組

合併( $i=1 \dots m$ )，以對該  $m$  個路徑分別產生下列運算結果。

$$M_{11}v_1 + M_{12}v_2 + \dots + M_{1n}v_n$$

$$M_{21}v_1 + M_{22}v_2 + \dots + M_{2n}v_n$$

...

$$M_{m1}v_1 + M_{m2}v_2 + \dots + M_{mn}v_n$$

**【0219】** 由於光學振幅調變可將光學訊號的功率自其完整值降低至一較低值，最低可至零(或接近零)功率，故可實施乘以0至1之間任何值的運算。然而，某些運算可能需要乘以大於1的數值，及/或乘以有號(正或負)數值。首先，若需要將範圍延伸為0至  $M_{\max}$  (其中  $M_{\max} > 1$ )，則對該等光學訊號的原始調變可包括明示或隱含地縮放原始向量元素振幅  $M_{\max}$  倍(或等效地，對線性映射至一特定向量元素振幅的值縮放  $1/M_{\max}$  倍)，使矩陣元素振幅0至1的範圍在該運算中定量地對應於0至  $M_{\max}$  的範圍。其次，若需要將矩陣元素值的正數範圍0至  $M_{\max}$  延伸至有號範圍  $-M_{\max}$  至  $M_{\max}$ ，則可使用對稱差動(symmetric differential)配置，如下文所述。相似地，對稱差動配置亦可用於將被編碼在多種訊號上的數值的正數範圍延伸至有號數值範圍。

**【0220】** 第22圖顯示一對稱差動配置2000的範例，用於對被編碼在光學訊號上的數值提供一有號數值範圍。在此範例中，有二個相關的光學訊號，其上編碼無號數值  $V_1^+$  及  $V_1^-$ ，其中假定該二數值皆在0(例如對應於接近0的光功率)至  $V_{\max}$  (例如對應於最大功率等級的光功率)之間變化。該二光學訊號之間的關係為當一光學訊號

上編碼一「主要」數值  $V_1^+$  時，另一光學訊號上將編碼一對應「反對稱」數值  $V_1^-$ ，使編碼在一光學訊號上的主要數值  $V_1^+$  自 0 單調遞增至  $V_{max}$  時，編碼在配對光學訊號上的反對稱數值  $V_1^-$  自  $V_{max}$  單調遞減至 0。或反之，當編碼在一光學訊號上的主要數值  $V_1^+$  自  $V_{max}$  單調遞減至 0 時，編碼在配對光學訊號上的反對稱數值  $V_1^-$  自 0 單調遞增至  $V_{max}$ 。當上方路徑及下方路徑的工學訊號皆由個別的光感測模組 1906a 及 1906b 轉換為電流訊號後，該等電流訊號之間的差值可由一電流減法模組 2002 產生。編碼  $V_1^+$  及  $V_1^-$  的電流訊號之間的差值造成一編碼為有號數值  $V_1$  的電流，其中  $V_1$  為：

$$V_1 = V_1^+ - V_1^-$$

其中當無號主要數值  $V_1^+$  自 0 單調遞增至  $V_{max}$ 、而其配對反對稱數值  $V_1^-$  自  $V_{max}$  單調遞減至 0 時，有號數值  $V_1$  在  $-V_{max}$  至  $V_{max}$  之間單調遞增。多種技術可用於實施第 22 圖中的對稱差動配置，如第 23 圖及第 24 圖所示。

**【0221】** 在第 23 圖中，該等光學訊號在一共同端點 (common-terminal) 配置中被感測，其中二個光電二極體感測器連接至一運算放大器 2030 的一共同端點 2032 (例如反相端)。在此配置中，自第一光電二極體感測器 2012 產生的電流 2010 及自第二光電二極體感測器 2016 產生的電流 2014 在三個導體的接面 2018 合併，以產生電流 2010 及 2014 之間的差值電流 2020。電流 2010 及 2014 由個別光電二極體的相反側提供，該等光電二極體的另一側分別連接至電壓源 (未圖示)，該二電壓源提供大小相同 ( $V_{bias}$ ) 但符號相反

的偏壓，如第23圖所示。在此配置中，該差值電流是由於在共同接面2018上匯聚的電流特性而產生。差值電流2020代表被編碼在一電訊號上的有號數值，對應於被編碼在感測到的光學訊號上的無號數值之間的差值。運算放大器2030可以轉阻放大器(TIA)形式配置，其中另一端點2024接地，且輸出端2026以一電阻元件2028回授至共同端點2032，其中電阻元件2028提供一電壓，與差值電流2020成正比。此一TIA配置以電壓訊號形式的電訊號提供運算結果數值。

**【0222】** 在某些使用TIA將光電流轉換為電壓的感測器實施例中，會使用某些技術以減輕用作光感測器2012及2016的光電二極體的內電容所導致的效應。光電二極體的內電容 $C_d$ 可模型化為與一理想光電二極體並聯的電容。內電容所導致的一種效應為當電流快速改變時，該內電容將形成短路，限制了該感測器的頻寬。一般而言，與對運算放大器2030的輸入電流2020造成的改變相關的時間常數 $\tau$ 應維持在較小數值，以避免明顯的頻寬限制。若未使用減輕相關效應的技術，則此一時間常數將約略等於電容 $C_d$ 乘以運算放大器2030的輸入電阻 $R_{in}$ ，其中 $R_{in}$ 約等於電阻元件2028造成的回授電阻 $R_f$ 除以運算放大器增益 $A$ ，得出： $\tau = C_d R_f / A$ 。此一效應對具有較大數量相互並聯的光電二極體的系統(如本說明書中所述的某些系統)特別不利，因相互並聯的電容將疊加為一個大的有效電容。然而，若以達成高運算放大器增益 $A$ 的方式減低該時間常數，則在使用大量此等TIA電路的系統中將消耗大量功率。為減輕頻寬限制而



不需要消耗如此多的功率，可將一電壓隨耦器(voltage follower，或稱單位增益放大器(unity-gain amplifier)或緩衝放大器(buffer amplifier))電路，經由將一給定電壓隨耦器連接至一給定光電二極體的輸入端與輸出端，與每一光電二極體並聯配置。該電壓隨耦器提供所需的電流以維持輸入端及輸出端電壓約略相等，可防止該光電二極體內電容在電流快速改變時形成短路，使時間常數 $\tau$ 接近0。使用電壓隨耦器使該等TIA電路的運算放大器增益A得以相對低(例如低於1000或低於100)，降低了系統的功率需求。

【0223】 在第24圖中，該等光學訊號在一差動端點(differential-terminal)配置中被感測，其中二個光電二極體感測器連接至運算放大器2050的不同端點。在此配置中，自第一光電二極體感測器2042產生的電流2040連接至反相端2052，而自第二光電二極體感測器2046產生的電流2044連接至非反相端2054。電流2040及2044由個別光電二極體的另一側提供，該等光電二極體的另一側分別連接至電壓源(未圖示)，該二電壓源提供大小相同( $V_{bias}$ )且符號相同的偏壓，如第24圖所示。在此配置中，運算放大器2050的輸出端2056提供一電流，與電流2040及電流2044的差值成正比。在此配置中，此一差值是由運算放大器2050的電路特性產生的。自輸出端2056流出的該差值電流代表被編碼在一電訊號上的有號數值，該有號數值對應於被編碼在感測到的光學訊號之間的無號數值之間的差值。

【0224】 第25圖顯示一對稱差動配置2100的範例，用於對作

為光學振幅調變器的調變等級被編碼的數值提供一有號數值範圍，其中該等光學振幅調變器實施乘法模組1904。在此範例中，有二個相關的調變器，被配置為以無號數值 $M_{11}^+$ 及 $M_{11}^-$ 調變，其中假定每一數值在0(例如對應於被調變而降低至接近0的光功率)至 $M_{max}$ (例如對應於被保留在接近最大功率等級的光功率)之間變化。該二調變等級之間的關係為當一調變等級被配置為一「主要」數值 $M_{11}^+$ 時，另一調變等級將被配置為一對應的「反對稱」數值 $M_{11}^-$ ，使一調變器的主要數值 $M_{11}^+$ 自0單調遞增至 $M_{max}$ 時，另一調變器的反對稱數值 $M_{11}^-$ 自 $M_{max}$ 單調遞減至0。或反之，當一調變器的主要數值 $M_{11}^+$ 自 $M_{max}$ 單調遞減至0時，另一調變器的反對稱數值 $M_{11}^-$ 自0單調遞增至 $M_{max}$ 。當編碼一數值 $V$ 的輸入光學訊號被複製模組1902複製後，每一調變器各提供一調變輸出光學訊號至一對應光感測模組1906。位於上方路徑的乘法模組1904包括一調變器，將 $V$ 乘以 $M_{11}^+$ ，並提供以數值 $M_{11}^+V$ 編碼的一光學訊號。位於下方路徑的乘法模組1904包括一調變器，將 $V$ 乘以 $M_{11}^-$ ，並提供以數值 $M_{11}^-V$ 編碼的一光學訊號。當該等光學訊號由個別的光感測模組1906轉換為電流訊號後，二者之差值可由一電流減法模組2102產生。編碼 $M_{11}^+V$ 及 $M_{11}^-V$ 的電流訊號之間的差值造成一編碼為一有號數值 $M_{11}$ 乘以 $V$ 的電流，如下：

$$M_{11}V = M_{11}^+ V - M_{11}^- V$$

其中當無號主要數值 $M_{11}^+$ 自0單調遞增至 $M_{max}$ 、而其配對反對稱數值 $M_{11}^-$ 自 $M_{max}$ 單調遞減至0時，有號數值 $M_{11}$ 在 $-M_{max}$ 至 $M_{max}$ 之間

單調遞增。

【0225】 第26圖顯示一系統配置2110的範例，該配置為系統1800的一實施，用於使用 $2 \times 2$ 矩陣進行向量-矩陣乘法，其中加法運算在電領域進行，且輸入向量及矩陣具有有號元素。在此範例中，對輸入向量的每一有號元素而言，有二個相關的光學訊號，其上編碼無號數值。對第一有號輸入向量元素值 $V_1$ 有二個無號數值 $V_1^+$ 及 $V_1^-$ ，對第二有號輸入向量元素值 $V_2$ 有二個無號數值 $V_2^+$ 及 $V_2^-$ 。每一個編碼在光學訊號上的無號數值由一複製模組2112接收，該複製模組進行一次或多次光學複製運算，在四個個別的光徑上得出四個該光學訊號的複本。在複製模組2112的某些實施中，有三個不同的Y形波導分配器，每一個皆被配置為使用不同的功率比(可使用例如多種光子裝置中任何一種達成)分配功率。例如，一第一分配器可使用1:4的功率比分配功率，以將功率的25%(1/4)轉移至一第一路徑、一第二分配器可使用1:3的功率比分配功率，以將功率的25%( $1/4 = 1/3 \times 3/4$ )轉移至一第二路徑、一第三分配器可使用1:2的功率比分配功率，以將功率的25%( $1/4 = 1/2 \times 2/3 \times 3/4$ )轉移至一第三路徑、並將剩餘的25%功率分配至一第四路徑。例如，作為複製模組2112一部分的該等個別分配器可佈設在一基板的不同部位，以適當地分配不同複本至系統中的不同路徑。在複製模組2112的其他實施中，可有不同數量的路徑，視情況以不同分配比被分配。例如，一第一分配器可使用1:2的功率比分配功率，以提供二個中間光學訊號。接著，其中一個中間光學訊號可以一分配比為1:2的第二分

配器各將25%的功率轉移至一第一路徑及一第二路徑，且另一中間光學訊號可以一分配比為1:2的第三分配器各將25%的功率轉移至一第三路徑及一第四路徑。

【0226】系統配置2110亦包括其他模組，其佈設情形如第26圖所示，以提供二個不同輸出電訊號，該二輸出電訊號代表一輸出向量，為系統100進行的向量-矩陣乘法的運算結果。該系統配置中有16個不同的乘法模組1904，對代表輸入向量的光學訊號的不同複本進行調變，並有16個不同的光感測模組1906，提供代表該運算中間結果的電訊號。該系統配置中亦有二個不同的加法模組2114A及2114B，運算中間結果的總和，以作為輸出電訊號。圖中，將光感測模組1906電耦接至加法模組2114B的訊號線以虛線表示。由於各總和中可能包括某些來自任何對向量元素及／或矩陣元素的對稱差動配置、自配對主要項中減去的反對稱項，故加法模組2114A及2114B可包括一機制，以將某些加總項先取反相後再相加(等效於自非反相項中減去)。例如，在某些實施中，加法模組2114A及2114B包括反相及非反相輸入埠，使總和中的相加項連接至非反相輸入埠、相減項連接至反相輸入埠。此一加法模組的一種範例實施為一運算放大器，其中非反相端連接至傳導代表相加訊號的電流的導線，而反相端連接至傳導代表相減訊號的電流的導線。或者，該等加法模組中，若該等反對稱項的反相以其他方式取得，則可不需要反相輸入埠。加法模組2114A及2114B分別得出下列加總結果，以完成向量-矩陣乘法。

$$M_{11}V_1 + M_{12}V_2 = (M_{11}^+ - M_{11}^-)(V_1^+ - V_1^-) + (M_{12}^+ - M_{12}^-)(V_2^+ - V_2^-)$$

$$M_{21}V_1 + M_{22}V_2 = (M_{21}^+ - M_{21}^-)(V_1^+ - V_1^-) + (M_{22}^+ - M_{22}^-)(V_2^+ - V_2^-)$$

【0227】 在本說明書中，若圖式顯示二個電訊號線相互交叉，則該二電訊號線是否相互電耦接可由說明書敘述中得知。例如，攜帶 $M_{21}^+V_1^+$ 訊號的訊號線與攜帶 $M_{11}^+V_1^-$ 訊號的訊號線或攜帶 $M_{11}^-V_1^-$ 訊號的訊號線並不電耦接。

【0228】 第26圖中顯示的系統配置可延伸以實施一系統配置，用於使用 $m \times n$ 矩陣進行向量-矩陣乘法，其中輸入向量及矩陣包括有號元素。

【0229】 多種技術可用於實施第26圖中的對稱差動配置。其中某些技術使用 $1 \times 2$ 光學振幅調變器，以實施乘法模組1904及／或提供相互關聯的主要-反對稱配對光學訊號。第27圖顯示一 $1 \times 2$ 光學振幅調變器2200的範例。在此範例中， $1 \times 2$ 光學振幅調變器2200包括一輸入光分配器2202，對一傳入光學訊號進行分配，以提供功率的50%至一包括相位調變器2204(亦稱移相器)的第一路徑、並提供功率的50%至一不包括相位調變器的第二路徑。該等路徑可以不同方式定義，依該光學振幅調變器以自由空間干涉儀或波導干涉儀實施而定。例如，在自由空間干涉儀中，一路徑定義為光波自一分光器穿透的路徑、另一路徑定義為光波自該分光器反射的路徑。在波導干涉儀中，每一路徑由耦接至一傳入波導的不同光波導定義(例如在一Y形分配器中)。相位調變器2204可被配置以施加一相位移，使該第一路徑的總相位延遲與該第二路徑的總相位延遲之間有一可

配置相位移值(例如一個介於0度至180度之間、可在某處設定至相位移的數值)的差值。

**【0230】** 1×2光學振幅調變器2200包括一2×2耦合器2206，將來自第一及第二輸入路徑的光波使用光學干涉或光學耦合以特定方式合併，以將功率以不同比例轉移至第一及第二輸出路徑，依相位移而定。例如，在自由空間干涉儀中，0度的相位移會造成大致上所有分配在二路徑之間的輸入功率形成相長干涉，以從使用耦合器2206的一分光器的一輸出路徑輸出，而180度的相位移會造成大致上所有分配在二路徑之間的輸入功率形成相長干涉，以從使用耦合器2206的該分光器的另一輸出路徑輸出。在波導干涉儀中，0度的相位移會造成大致上所有分配在二路徑之間的輸入功率耦合至耦合器2206的一輸出波導(例如2208a)，而180度的相位移會造成大致上所有分配在二路徑之間的輸入功率耦合至耦合器2206的另一輸出波導(例如2208b)。接著，在0度至180度之間的相位移可使用一光波(及編碼在該光波上的數值)藉由部分相長或相消干涉、或部分波導耦合，對該功率提供一介於0至1之間的乘數。接著，乘以0至1之間任一數值的運算可映射至乘以0至 $M_{max}$ 之間任一數值的運算，如前文所述。

**【0231】** 此外，自調變器2200發出的二光波功率之間的關係遵循前文所述的主要-反對稱配對關係。當一訊號的光功率振幅增加時，另一訊號的光功率振幅下降，使感測到的光電流之間的差值可得出有一號向量元素、或與一有號矩陣元素相乘，如前文所述。例

如，該相關光學訊號配對可由調變器2200的二個輸出埠提供，使該等相關光學訊號之間的振幅差值對應於將一輸入值與一有號矩陣元素值相乘的結果。第28圖顯示1×2光學振幅調變器2200的一種對稱差動配置2210，其中輸出端的光學訊號被配置為由第23圖中的對稱差動配置的共同端點版本感測。與一對光感測器2212及2214所產生的光電流對應的電流訊號在接面2216合併，以提供一輸出電流訊號，其振幅對應於該二相關光學訊號間的振幅差值。在其他範例中，例如在第24圖的對稱差動配置中，由該二光學訊號感測而得的光電流在輸出端可使用不同電路合併。

【0232】 其他技術亦可用於建構1×2光學振幅調變器，以實施乘法模組1904，及／或提供以主要-反對稱配對形式相互關聯的一對光學訊號。第29圖為對稱差動配置2220的另一範例，顯示另一種類的1×2光學振幅調變器。在此範例中，該1×2光學振幅調變器包括一環形諧振器2222，被配置以將輸入埠2221的光學訊號的光功率分配至二個輸出埠。環形諧振器2222(亦稱為「微環」)可藉由例如在一基板上形成一圓形波導而製造，其中該圓形波導耦接至一對應於輸入埠2221的直線波導。當該光學訊號的波長接近與環形諧振器2222關聯的一諧振波長時，耦接至該環的光波會沿著該環以一順時針路徑2226循環移動，並在耦接處形成相消干涉，使一較低功率的光波沿路徑2224傳出一第一輸出埠。該循環光波亦耦接至環外，使另一光波沿路徑2228經由一彎曲波導傳出，該彎曲波導將光波引導至一第二輸出埠。

【0233】 由於光功率沿著環形諧振器2222循環移動的時間尺度小於光學訊號振幅調變的時間尺度，故一反對稱功率關係可快速在該二輸出埠之間形成，使光感測器2212及2214感測到的光波形成主要-反對稱配對。環形諧振器2222的諧振波長可被調整，以單調遞減／遞增該主要／反對稱訊號，如前文所述。當該環完全非諧振(off-resonance)時，所有功率皆經由路徑2224傳出該第一輸出埠，而當該環完全諧振(on-resonance)時，若適當調整某些其他參數(例如品質因子(quality factor)及耦合係數(coupling coefficient))，則所有功率皆經由路徑2228傳出該第二輸出埠。特定而言，為達成完全功率轉移，將該波導及該環形諧振器之間的耦合效率特徵化的耦合係數應匹配。在某些實施例中，可使用一相對平滑的調諧曲線(tuning curve)，其可藉由降低環形諧振器2222的品質因子(例如增加損耗)並對應地增加進入及離開該環的耦合係數達成。平滑的調諧曲線提供諧振波長較低的振幅敏感度。溫度控制等技術亦可用於調整或穩定諧振波長。

【0234】 第30圖為對稱差動配置2230的另一範例，顯示另一種類的1×2光學振幅調變器。在此範例中，該1×2光學振幅調變器包括二個環形諧振器2232及2234。輸入埠2231的光學訊號的光功率被分配至二埠。當該光學訊號的波長接近與環形諧振器2232及2234關聯的一諧振波長時，一較低功率的光波會經由路徑2236傳出一第一輸出埠。該光波的一部分亦耦接至環形諧振器2232，沿該環以一順時針路徑2238循環移動，且亦耦接至環形諧振器2234，沿



該環以一逆時針路徑2240循環移動。接著，該循環光波耦接至環外，使另一光波經由路徑2242傳出一第二輸出埠。在此範例中，由光感測器2212及2214感測到的光波亦形成主要-反對稱配對。

【0235】 第31圖及第32圖顯示不同範例，將光學振幅調變器(例如1×2光學振幅調變器2200)用於實施系統1800，以對2×2矩陣進行向量-矩陣乘法。第31圖顯示一光電系統配置2300A的範例，包括光學振幅調變器2302A及2302B，提供代表輸入向量的有號向量元素的數值。調變器2302A提供一對光學訊號，其上編碼數值 $V_1^+$ 及 $V_1^-$ 以代表第一有號向量元素，而調變器2302B提供一對光學訊號，其上編碼數值 $V_2^+$ 及 $V_2^-$ 以代表第二有號向量元素。一向量-矩陣乘法器(vector-matrix multiplier, VMM)子系統2310A如前文所述接收該等輸入光學訊號、進行分配運算、乘法運算及某些加法運算，並提供輸出電流訊號供一額外電路處理。在某些範例中，該等輸出電流訊號代表部分和，該等部分和被進一步處理以產生最終總和，該等最終總和形成輸出向量的有號向量元素。在此範例中，某些最終加法運算以運算放大器2306A及2306B的反相端及非反相端所代表的不同部分和之間的減法運算進行。該等減法運算用於提供有號數值，如前文所述(例如參見第26圖)。此範例亦圖示了某些元素可作為多個模組的一部分。特定而言，由波導分配器2303進行的光學複製可視為複製模組的一部分(例如第26圖中的複製模組2112之一)及乘法模組的一部分(例如第26圖中的乘法模組1904之一)。在VMM子系統2310A內使用的光學振幅調變器被配置為在

23圖所示的共同端點配置下進行感測。

【0236】 第32圖顯示一光電系統配置2300B的範例，其與第31圖所示的光電系統配置2300A相似。然而，VMM子系統2310B包括的光學調變器是被配置為在第24圖所示的差動端點配置下進行感測。在此範例中，VMM子系統2310B的輸出電流訊號亦代表部分和，該等部分和被進一步處理以產生最終總和，該等最終總和形成輸出向量的有號向量元素。以運算放大器2306A及2306B的反相端及非反相端所代表的不同部分和之間的減法運算進行的最終加法運算與第31圖範例中的運算不同。然而，該等最終減法運算仍可得出該等有號數值，如前文所述(例如參見第26圖)。

【0237】 第33圖顯示一光電系統配置2300C的範例，其使用另一種配置的VMM子系統2310C，其中光感測與第31圖中的VMM子系統2310A同樣在共同端點配置下進行，然而其中攜帶乘法模組運算結果的光學訊號在波導中(例如在一半導體基板中)經由該子系統路由至該基板中包括感測器的部分，其中該等感測器被配置以將該等光學訊號轉換為電訊號。在第33圖中，光波導2304a、2304b、2304c、2304d、2304e、2304f、2304g及2304h(統稱為2304)以粗虛線表示。在某些實施例中，將感測器聚集於一處可縮短電路徑，可減少使用較長電路徑時導致的串擾(crosstalk)或其他不利狀況。在某些實施中，該等光波導可在該基板的一層內路由、或在該基板的多層內路由，以增加路由路徑的彈性，以便路由在二維平面交叉、但不在第三維度(該基板的深度)交叉的路徑。該系統配置中

尚可進行多種其他改變，例如改變VMM子系統中所包含的部件。例如，光學振幅調變器2302A及2302B可作為該VMM子系統的一部分被包含於其中。或者，該VMM子系統可包括光學輸入埠，以接收由光學振幅調變器以外的模組產生的配對主要-反對稱光學訊號，或與其他種類的子系統通訊。

**【0238】** 第34圖顯示一系統配置2400A的範例，用於實施系統1800，其中多個裝置2410作為不同乘法模組的主機(例如乘法模組1806A、1806B、1806C及1806D)，每一裝置皆被配置為一VMM子系統，以在不同向量元素子集合與一較大矩陣的不同子矩陣之間進行向量-矩陣乘法。例如，每一乘法模組可被配置為與系統配置2110(第26圖)相似，然而每一乘法模組可被配置為使用一矩陣實施VMM子系統，其中該矩陣的大小為可高效地在具有與該裝置內各模組共同的基板的單一裝置上製造的大小，而非使用 $2 \times 2$ 矩陣實施VMM子系統。例如，每一乘法模組可使用 $64 \times 64$ 矩陣實施VMM子系統。

**【0239】** 該等不同的VMM子系統被配置為將每一子矩陣的運算結果適當地合併，以得出較大合併矩陣的運算結果(例如由一向量與一 $128 \times 128$ 矩陣相乘的運算得出的128元素向量的各元素)。每一組光埠或光源2402提供一組光學訊號，代表一較大輸入向量的向量元素的不同子集合。複製模組2404被配置以複製一接收光學訊號集合內的所有光學訊號，其中該等接收光學訊號被編碼在經由64個光波導的集合2403引導的光波上，並提供該光學訊號集合至二個不

同的光波導集合，該等光波導集合在本範例中為具有64個光波導的集合2405A及具有64個光波導的集合2405B。此一複製運算可經由例如使用一波導分配器陣列而進行，其中該陣列中的每一分配器經由將光波導集合2403中的光波分配為光波導集合2405A中的一第一對應光波及光波導集合2405B中的一第二對應光波，對輸入向量元素的該子集合(例如對每一複製模組2404而言為具有64個元素的子集合)中的一元素進行複製。

【0240】 在某些實施例中，若使用多個波長(例如W個波長)，則單獨波導的數量(及因此2402中單獨光埠或光波的數量)可減少為例如 $1/W$ 倍。每一VMM子系統裝置2410進行向量-矩陣乘法，以一電訊號集合的形式提供其部分結果(作為輸出向量元素的一子集合)，來自不同裝置2410的對應部分結果配對由加法模組2414使用本說明書中所述的任何技術(例如導體接面上的電流加總)相加，如第34圖所示。在此範例中，裝置2410a的輸出經由一電線2416a傳遞至加法模組2414a，而裝置2410b的輸出經由一電線2416b傳遞至加法模組2414a。

【0241】 在某些實施中，使用所欲矩陣的向量-矩陣乘法可經由合併較小子矩陣的運算結果遞迴進行，其可具有任何遞迴層數，當使用遞迴的根層級的單一元素光學振幅調變器時運算結束。在不同的遞迴層級下，該VMM子系統裝置可更為小巧(例如在一層級中不同的資料中心以長距離光纖網路連結、在另一層級中一資料中心內的不同多晶片裝置以光纖連結、在又一層級中一裝置內的不同晶

片以光纖連結、在更又一層級中同一晶片內的不同模組區段以晶片上(on-chip)的波導連結)。

【0242】 第35圖顯示另一範例系統配置2400B，其中使用額外的裝置以對每一VMM子系統2410進行光學傳輸及接收。在某些實施中，不同的向量-矩陣乘法器子系統2410各從屬於單獨的裝置及／或分布在分離的遠端位置上。在此範例中，在每一VMM子系統的輸出端2418(該輸出端2418提供電訊號)，一光學傳輸器陣列2420用於將該等電訊號轉換為光學訊號，並將各光學訊號耦接至一光學傳輸線中的一通道，例如在VMM子系統2410之間的光纖束2416中的一光纖，其中該等VMM子系統2410從屬於單獨的裝置及／或分布在遠端位置上。光學傳輸器陣列2420可包括例如一雷射二極體陣列，將VMM子系統2410輸出端的電訊號轉換為光學訊號。在某些實施中，不同的VMM子系統2410位於一整合裝置(例如系統單晶片(system-on-a-chip))中的不同區域，該整合裝置作為位於共同基板上的該等VMM子系統2410的主機。在此範例中，在每一VMM子系統2410的輸出端2418，一光學傳輸器陣列2420用於將輸出端2418的電訊號轉換為光學訊號，並將每一光學訊號耦接至波導集合2416中一波導中的一通道，其中該波導集合2416位於該整合裝置的不同區域之間。對輸出向量元素的每一子集合，使用一光學接收器陣列2422，以在對應的部分和配對由加法模組2414相加之前，將該等光學訊號轉換為電訊號。

【0243】 第36圖顯示另一範例系統配置2400C，其中該等

VMM子系統2410可被重新配置，以使對不同子矩陣的不同向量-矩陣乘法可以不同方式被重新安排。例如，由合併不同子矩陣形成的較大矩陣的形狀可為可配置的。使用者可基於運算需求，動態配置該等不同子矩陣的合併方式。此一配置可提供光學處理器的運算更大的彈性。在此範例中，二個不同的光學訊號子集合2424a及2424b由各光埠或光源2402提供至光學開關2430。該系統配置中亦有電開關2440，其可重新安排代表將由加法模組2414相加的部分運算結果的電訊號子集合，以對所欲的運算提供一輸出向量、或單獨的多個輸出向量。例如，VMM子系統2410可被重新安排為使用大小為 $2m \times n$ 或 $m \times 2n$ 的矩陣進行向量-矩陣乘法運算，而非使用由四個大小為 $m \times n$ 的子矩陣構成的 $2m \times 2n$ 矩陣。

【0244】 第37圖顯示另一範例系統配置2400D，其中該等VMM子系統2410可以額外方式被重新配置。光學開關2430最多可接收分離的四組光學訊號，且可被配置以提供不同組的光學訊號至不同的VMM子系統2410、或複製其中任一組光學訊號至多個VMM子系統2410。又，電開關2440可被配置以提供接收到的電訊號集合的任何組合至加法模組2414。此一較高的可重新配置性使更多種不同的向量-矩陣乘法運算得以進行，包括使用大小為 $m \times 3n$ 、 $3m \times n$ 、 $m \times 4n$ 、 $4m \times n$ 的矩陣進行的乘法運算。

【0245】 第38圖顯示另一範例系統配置2400E，包括可進行多種運算(例如數位邏輯運算)的額外電路，以使系統配置2400E(例如在一完全光電運算系統、或一更大運算平台中的光電子系統中)

得以用於實施人工神經網路或其他形式的機器學習等運算技術。資料儲存子系統2450可包括揮發性(volatile)儲存媒體(例如SRAM及／或DRAM)及／或非揮發性(non-volatile)儲存媒體(例如固態硬碟及／或硬碟)。資料儲存子系統2450亦可包括階層式快取(hierarchical cache)模組。被儲存的資料可包括例如訓練資料、中間結果資料或生產資料等用於提供予線上運算系統的資料。資料儲存系統2450可被配置以提供對輸入資料的同時(concurrent)存取，使對光埠或光源2402所提供的不同光學訊號的調變得以進行。將以數位形式儲存的資料轉換為可用於進行調變的類比形式的動作可以電路(例如數位-類比轉換器)進行，其中該電路被包含於資料儲存子系統2450的輸出端、或光埠／光源2402的輸入端、或分配在二者之間。一輔助處理子系統2460可被配置以對在使用VMM子系統2410進行的向量-矩陣乘法的多次迭代中可循環使用的資料進行輔助運算(例如非線性運算、資料挪移等)。從該等輔助運算得出的結果資料2462可以數位形式傳送至資料儲存子系統2450。由資料儲存子系統2450提取的資料可用於以適當的輸入向量對光學訊號進行調變、及用於提供控制訊號(未圖示)，其中該控制訊號用於設定VMM子系統2410中的光學振幅調變器的調變等級。將編碼在電訊號上的類比形式資料轉換為數位形式的動作可以輔助處理子系統2460內的電路(例如類比-數位轉換器)進行。

**【0246】** 在某些實施中，一數位控制器(未圖示)被用於控制資料儲存子系統2450、階層式快取模組、多種電路(例如數位-類比轉

換器及類比-數位轉換器)、VMM子系統2410及光源2402的運作。例如，該數位控制器被配置為執行程式碼以實施一具有數個隱藏層的神經網路。該數位控制器迭代進行與該神經網路的多個層級關聯的矩陣處理。該數位控制器經由自資料儲存子系統2450提取第一矩陣資料、及基於提取的資料設定VMM子系統2410中的光學振幅調變器的調變等級，進行矩陣處理的第一次迭代，其中該第一矩陣資料代表該神經網路第一層的係數。該數位控制器自該資料儲存子系統提取一輸入資料集合，並對光源2402設定調變等級，以產生一光學輸入訊號集合，代表一第一輸入向量的各元素。

**【0247】** VMM子系統2410基於該第一輸入向量及該第一矩陣資料進行矩陣處理，代表由該神經網路第一層進行的訊號處理。當輔助處理子系統2450產生一第一集合的結果資料2462後，該數位控制器經由自該資料儲存子系統提取代表該神經網路第二層的係數的第二矩陣資料，進行矩陣處理的第二次迭代，並基於該第二矩陣資料設定VMM子系統2410中的光學振幅調變器的調變等級。第一集合的結果資料2462作為第二輸入向量，用以設定光源2402的調變等級。VMM子系統2410基於該第二輸入向量及該第二矩陣資料進行矩陣處理，代表由該神經網路第二層進行的訊號處理，以此類推。在最後一次迭代中，產生由該神經網路最後一層進行的訊號處理的輸出。

**【0248】** 在某些實施中，當進行與一神經網路中的隱藏層關聯的運算時，該等結果資料2462並不傳送至資料儲存子系統



2450，而是由該數位控制器用於直接控制數位-類比轉換器，其中該等數位-類比轉換器產生控制訊號，用於設定VMM子系統2410中的光學振幅調變器的調變等級。此一配置可減少對資料儲存子系統2450進行儲存資料與存取資料所需的時間。

**【0249】** 其他處理技術可併入其他系統配置範例中。例如，多種使用其他種類向量-矩陣乘法子系統(例如使用光學干涉、但不使用本說明書所述之電學加法或有號乘法的子系統)的技術可併入某些系統配置中，例如美國專利第2017/0351293號中所述的某些技術，該專利文件特此併入參照文件。

**【0250】** 參見第51圖，在某些實施中，人工神經網路(ANN)運算系統3200包括調變器陣列3208，該調變器陣列3208使用片段式調變器設計，例如片段式MZI調變器，例如第8-16圖及第47-50圖中所示者。例如，當每一數位輸入向量的長度為4時，調變器陣列3208可被配置為類似第50圖中的調變器陣列5000。ANN運算系統3200包括光電矩陣乘法單元3220，該光電矩陣乘法單元3220具有例如第19-37圖所示的複製模組、乘法模組及加法模組，得以在進行矩陣運算時處理非同調或低度同調的光學訊號。ANN運算系統3200包括控制器110、記憶單元120及ADC單元160，與第1圖系統100中的該等元件相似。ANN運算系統3200包括調變器控制單元3202，該調變器控制單元3202包括第一DAC子單元3204及第二DAC子單元3206。第一DAC子單元3204包括多個高速1位元DAC，其中每一1位元DAC驅動一移相器，例如第8、10、11及15

圖中的3956、第9圖中的3960、3968及3972、第47-49圖中的4714、或第50圖中的子調變器5022、5024、5026及5028。例如，每一1位元DAC可產生1位元調變器控制訊號。該1位元DAC可直接自控制器110接收一個二元數位輸出，並將該二元訊號調節為一個適合驅動調變器陣列3208中一對應移相器的二等級電壓或電流輸出。第一DAC子單元3204可包括電荷幫浦驅動電路，例如第3、9、15及48圖中所示者，用以移動電荷至／自該等移相器。例如，第一DAC子單元3204可被配置為進行預加重及去加重，以增加頻寬，如前文所述。控制器110自電腦102接收請求，並傳送運算輸出至電腦102，類似於第1圖中所示者。

**【0251】** 在某些範例中，OMM單元3220包括不具有片段式設計的MZI，且第二DAC子單元3206可相似於第1圖中的第二DAC子單元134。此一配置可在OMM單元3220的重新配置速率慢於調變器陣列3208的重新配置速率時，用於進行ANN運算。

**【0252】** 在某些範例中，OMM單元3220包括具有片段式設計的MZI，且第二DAC子單元3206可與第一DAC子單元3204相似地包括多個1位元DAC。第二DAC子單元3206亦可與第一DAC子單元3204相似地包括電荷幫浦驅動電路，並進行預加重及去加重，以增加頻寬。

**【0253】** 光電處理器3210包括光源3230，該光源3230可與第1圖中的雷射單元142相似，其中該光源3230的多個輸出訊號彼此同調。光源3230亦可使用發光二極體，以產生多個非同調或低度同

調的輸出訊號。調變器陣列3208接收由第一DAC子單元3204基於一輸入向量產生的調變器控制訊號。調變器陣列3208的輸出類似於第19圖中的光埠／光源1802的輸出。光電矩陣乘法單元3220以相似於第19圖中複製模組1804、乘法模組1806及加法模組1808處理來自光埠／光源1802的光學訊號的方式，處理來自調變器陣列3208的光訊號。

【0254】參見第52圖，光電矩陣乘法單元3220接收一輸入向量  $\vec{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$ ，並將該輸入向量與一矩陣  $\vec{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & \cdots & M_{mn} \end{bmatrix}$  相乘，以產生一輸出向量  $\vec{y} = \begin{bmatrix} M_{11}v_1 + M_{12}v_2 + \cdots + M_{1n}v_n \\ M_{21}v_1 + M_{22}v_2 + \cdots + M_{2n}v_n \\ \vdots \\ M_{m1}v_1 + M_{m2}v_2 + \cdots + M_{mn}v_n \end{bmatrix}$ 。

【0255】光電矩陣乘法單元3220包括m個光徑1803\_1、1803\_2、...、1803\_m(統稱為1803)，攜帶代表該輸入向量的光學訊號。複製模組1804\_1提供輸入光學訊號 $v_1$ 的複本至乘法模組1806\_11、1806\_21、...、1806\_m1。複製模組1804\_2提供輸入光學訊號 $v_2$ 的複本至乘法模組1806\_12、1806\_22、...、1806\_m2。複製模組1804\_n提供輸入光學訊號 $v_n$ 的複本至乘法模組1806\_1n、1806\_2n、...、1806\_mn。

【0256】如前文所述，由複製模組1804\_1提供的光學訊號 $v_1$ 的各複本彼此振幅相同(或大致上相同)，但與調變器陣列3208提供的光學訊號 $v_1$ 的振幅不同。例如，若複製模組1804\_1將調變器陣列3208提供的訊號 $v_1$ 的功率平均分配至m個訊號，則該m個訊號中每

一訊號的功率將等於或小於調變器陣列3208提供的訊號 $v_1$ 功率的 $1/m$ 倍。

【0257】乘法模組1806\_11將輸入訊號 $v_1$ 與矩陣元素 $M_{11}$ 相乘，以產生 $M_{11} \cdot v_1$ 。乘法模組1806\_21將輸入訊號 $v_1$ 與矩陣元素 $M_{21}$ 相乘，以產生 $M_{21} \cdot v_1$ 。乘法模組1806\_m1將輸入訊號 $v_1$ 與矩陣元素 $M_{m1}$ 相乘，以產生 $M_{m1} \cdot v_1$ 。乘法模組1806\_12將輸入訊號 $v_2$ 與矩陣元素 $M_{12}$ 相乘，以產生 $M_{12} \cdot v_2$ 。乘法模組1806\_22將輸入訊號 $v_2$ 與矩陣元素 $M_{22}$ 相乘，以產生 $M_{22} \cdot v_2$ 。乘法模組1806\_m2將輸入訊號 $v_2$ 與矩陣元素 $M_{m2}$ 相乘，以產生 $M_{m2} \cdot v_2$ 。乘法模組1806\_1n將輸入訊號 $v_n$ 與矩陣元素 $M_{1n}$ 相乘，以產生 $M_{1n} \cdot v_n$ 。乘法模組1806\_2n將輸入訊號 $v_n$ 與矩陣元素 $M_{2n}$ 相乘，以產生 $M_{2n} \cdot v_n$ 。乘法模組1806\_mn將輸入訊號 $v_n$ 與矩陣元素 $M_{mn}$ 相乘，以產生 $M_{mn} \cdot v_n$ ，以此類推。

【0258】第二DAC子單元3206基於該等矩陣元素的數值產生控制訊號，並傳送該等控制訊號至乘法模組1806，以使乘法模組1806得以將該等輸入向量元素與該等矩陣元素相乘，例如以光學振幅調變等方式進行。例如，乘法模組1806\_11可包括一光學振幅調變器，且輸入向量元素 $v_1$ 與矩陣元素 $M_{11}$ 相乘的動作可經由將矩陣元素 $M_{11}$ 的數值編碼為施加至代表輸入向量元素 $v_1$ 的輸入光學訊號的振幅調變等級而達成。

【0259】加法模組1808\_1接收乘法模組1806\_11、1806\_12、... 1806\_1n的輸出，並產生一總和 $y_1$ 等於 $M_{11}v_1 + M_{12}v_2 +$

$\dots + M_{1n}v_n$ 。加法模組1808\_2接收乘法模組1806\_21、1806\_22、... 1806\_2n的輸出，並產生一總和 $y_2$ 等於 $M_{21}v_1 + M_{22}v_2 + \dots + M_{2n}v_n$ 。加法模組1808\_m接收乘法模組1806\_m1、1806\_m2、... 1806\_mn的輸出，並產生一總和 $y_m$ 等於 $M_{m1}v_1 + M_{m2}v_2 + \dots + M_{mn}v_n$ 。

【0260】 在系統3200中，OMM單元3220的輸出提供至ADC單元160，而不像第1圖中的系統100般通過感測單元146。此乃由於乘法模組1806或加法模組1808已先行將該等光學訊號轉換為電訊號，故在系統3200中不須使用單獨的感測單元146。

【0261】 第53圖為一流程圖，顯示一方法3300的範例，用於以第51圖中的ANN運算系統3200進行ANN運算。程序3300中的步驟可由系統3200中的控制器110進行。在某些實施中，方法3300中的各步驟可以平行、合併、迴圈或任何順序進行。

【0262】 在步驟3310中，一個包括一輸入資料集與一第一組神經網路加權值的人工神經網路(ANN)運算請求被接收。該輸入資料集包括一第一數位輸入向量。該第一數位輸入向量為該輸入資料集的一個子集合。例如，其可為一影像中的一個子區域。ANN運算請求可由多種實體產生，例如第51圖中的電腦102。電腦102可包括一種或多種運算裝置，例如個人電腦、伺服器電腦、車輛電腦或飛行電腦等。ANN運算請求一般而言指一電訊號，提示或通知ANN運算系統3200一個待進行的ANN運算。在某些實施中，該ANN運算請求可劃分為二個或更多訊號。例如，一第一訊號可對ANN運算

系統3200發出詢問(query)，以檢查系統3200是否已準備好接收該輸入資料集與該第一組神經網路加權值。回應於系統3200的肯定答覆，電腦102可傳送一第二訊號，包括該輸入資料集與該第一組神經網路加權值。

【0263】 在步驟3320中，該輸入資料集與該第一組神經網路加權值被儲存。控制器110可儲存該輸入資料集與該第一組神經網路加權值於記憶單元120中。將該輸入資料集與該第一組神經網路加權值儲存於記憶單元120中，可使ANN運算系統3200的運作更具彈性，可達到例如增進系統整體效能等效果。例如，可經由自記憶單元120提取該輸入資料集的所欲部分，將該輸入資料集劃分為多個預設大小及格式的數位輸入向量。該輸入資料集的不同部分可以多種順序被處理或挪移(shuffle)，以使多種ANN運算得以進行。例如，當輸入與輸出矩陣的大小不同時，挪移動作使矩陣乘法可以區塊矩陣乘法技術進行。又例如，將該輸入資料集與該第一組神經網路加權值儲存於記憶單元120中，可使ANN運算系統3200發出的多個ANN運算請求得以形成佇列(queueing)，使系統3200得以維持全速運作而避免產生不作動時段。

【0264】 在某些實施中，記憶單元120可包括一第一記憶子單元及一第二記憶子單元。該第一記憶子單元可為一記憶體，專用於儲存該輸入資料集與該等數位輸入向量，並可具有足以支援調變器陣列3208的調變率的運作速度。該第二記憶子單元可為一記憶體，專用於儲存該等神經網路加權值，並可具有足以支援OMM單元

3220的重新配置率的運作速度。在某些實施中，該第一記憶子單元可使用SRAM實施，而該第二記憶子單元可使用DRAM實施。在某些實施中，該第一及第二記憶子單元可使用DRAM實施。在某些實施中，該第一記憶子單元可作為控制器110的一部分或一快取實施。在某些實施中，該第一及第二記憶子單元可以單一實體記憶體裝置的不同位址空間實施。在某些實施中，該輸入資料集可儲存於該第一記憶子單元中，而該第一組神經網路加權值可儲存於該第二記憶子單元中。

【0265】 在步驟3330中，一第一組調變器控制訊號基於該第一數位輸入向量產生，一第一組加權值控制訊號基於該第一組神經網路加權值產生。控制器110可傳送一第一DAC控制訊號至調變器控制單元3202，以產生該第一組調變器控制訊號。第一DAC子單元3204基於該第一DAC控制訊號產生該第一組調變器控制訊號，且調變器陣列3208產生代表該第一數位輸入向量的光學輸入向量。

【0266】 該第一DAC控制訊號可包括多個數位值，該等數位值將由第一DAC子單元3204中的1位元DAC轉換為該第一組調變器控制訊號。該等數位值一般而言對應於該第一數位輸入向量，且該二者之間可經由多種數學關係或查找表形成關聯。例如，該等數位值可線性正比於該第一數位輸入向量的各元素值。又例如，該等數位值可經由一查找表與該第一數位輸入向量的各元素值形成關聯，其中該查找表被配置為在該數位輸入向量與調變器陣列3208產生的光學輸入向量之間維持一線性關係。

【0267】 控制器110可傳送一第二DAC控制訊號至調變器控制單元3202，以產生該第一組加權值控制訊號。第二DAC子單元3206基於該第二DAC控制訊號產生該第一組加權值控制訊號，且光電矩陣乘法單元3220依據該第一組加權值控制訊號被重新配置，以實施一矩陣，對應於該第一組神經網路加權值。

【0268】 該第二DAC控制訊號可包括多個數位值，該等數位值將由第二DAC子單元3206轉換為該第一組加權值控制訊號。該等數位值一般而言對應於該第一組神經網路加權值，且該二者之間可經由多種數學關係或查找表形成關聯。例如，該等數位值可線性正比於該第一組神經網路加權值。又例如，該等數位值可經由對該第一組神經網路加權值進行多種數學運算而得，以產生可對OMM單元3220進行配置的加權值控制訊號，以進行對應於該第一組神經網路加權值的矩陣運算。

【0269】 在步驟3340中，可得出第一組數位化輸出，對應於OMM單元3220的電輸出向量。由調變器陣列3208產生的光學輸入向量被OMM單元3220處理，並轉換為一電輸出向量。該電輸出向量由ADC單元160轉換為數位化數值。控制器110可例如傳送一轉換請求至ADC單元160，以開始將OMM單元3220的電壓輸出轉換為數位化輸出。當轉換完成後，ADC單元160可傳送轉換結果至控制器110。或者，控制器110可自ADC單元160提取該轉換結果。控制器110可自該等數位化輸出形成一數位輸出向量，對應於該數位輸入向量的矩陣乘法運算結果。例如，該等數位化輸出可被組織



或串接成向量形式。

【0270】 在某些實施中ADC單元160可被設定或控制為基於控制器110對調變器控制單元3202發出的一DAC控制訊號進行ADC轉換。例如，該ADC轉換可被設定為在調變器控制單元3202產生調變器控制訊號後的一預設時間開始。對ADC轉換的此一控制可簡化控制器110的運作，並減少必要控制操作的數量。

【0271】 在步驟3350中，對該第一數位輸出向量進行一非線性轉換，以產生一第一轉換數位輸出向量。ANN的一節點(或一人工神經元)的運作首先對接收自前一層節點的訊號進行加權和，接著對該加權和進行非線性轉換(「啟用」)以產生一輸出。多種ANN可實施多種可微分非線性轉換。非線性轉換函數的範例包括整流線性單位函數(RELU)、Sigmoid函數、雙曲正切函數、 $X^2$ 函數及 $|X|$ 函數。此等非線性轉換由控制器對該第一數位輸出向量進行，以產生該第一轉換數位輸出向量。在某些實施中，該等非線性轉換可由控制器110內的一專用數位積體電路進行。例如，控制器110可包括一個或多個模組或電路區塊，被專門調整以加速一種或多種非線性轉換運算。

【0272】 在步驟3360中，該第一轉換數位輸出向量被儲存。控制器110可儲存該第一轉換數位輸出向量於記憶單元120中。若該輸入資料集被劃分為多個數位輸入向量，則該第一轉換數位輸出向量對應於該輸入資料集一部分的ANN運算結果，例如該第一數位輸出向量。因此，儲存該第一轉換數位輸出向量使ANN運算系統3200

得以進行並儲存對該輸入資料集中其他數位輸入向量的額外運算，以便稍後將該等額外運算結果併入單一ANN輸出中。

【0273】 在步驟3370中，基於該第一轉換數位輸出向量產生的一ANN輸出被輸出。控制器110產生一ANN輸出，該ANN輸出為經由該第一組神經網路加權值所定義的ANN處理該輸入資料集的結果。若該輸入資料集被劃分為多個數位輸入向量，則所產生的ANN輸出為包括該第一轉換數位輸出的一合併輸出，但亦可進一步包括對應於該輸入資料集其他部分的額外轉換數位輸出。當該ANN輸出產生後，該已產生的輸出被傳送至一電腦(例如電腦102)，其中該電腦為發出該原始ANN運算請求者。

【0274】 在某些實施中，控制器110、記憶單元120、調變器控制單元3202、ADC單元160及一微處理器可於一半導體晶粒(die)上形成單片(monolithically)積體電路。在某些實施中，控制器110、記憶單元120、調變器控制單元3202、ADC單元160、該微處理器及系統主要記憶體可整合為一系統單晶片(system-on-chip)。在此等範例中，程序3300中的二個或更多步驟可由該單片積體電路或系統單晶片中的各模組進行。

【0275】 吾人可對實施方法3300的ANN運算系統3200定義多種效能指標。定義效能指標可使吾人得以將實施光電處理器3210的ANN運算系統3200與實施電子矩陣乘法單元的其他ANN運算系統的效能進行比較。就一方面而言，ANN運算的進行速率可部分以一第一迴圈時段表示，其定義為步驟3320在該記憶單元中儲存該輸

入資料集與該第一組神經網路加權值及步驟3360在該記憶單元中儲存該第一轉換數位輸出向量之間所經過的時間長度。因此，該第一迴圈時段包括轉換該等電訊號至光訊號(例如步驟3330)及在光學領域與電領域進行矩陣乘法(例如步驟3340)所花費的時間。步驟3320及3360皆包括將資料儲存至記憶單元120，此為ANN運算系統3200與不具有光電處理器3210的習知ANN運算系統共有的步驟。因此，測量記憶體至記憶體傳輸時間的第一迴圈時段可對ANN運算系統3200與不具有光電處理器3210的ANN運算系統(例如實施電子矩陣乘法單元的系統)的ANN運算產出量進行切合實際或公正的比較。

**【0276】** 基於調變器陣列3208產生光學輸入向量的速率(例如25 GHz)及OMM單元3220的處理速率(例如大於25 GHz)，ANN運算系統3200對單一數位輸入向量進行單一ANN運算的第一迴圈時段可接近調變器陣列3208速度的倒數，例如40皮秒。在計入與調變器控制單元3202產生訊號及ADC單元160進行ADC轉換相關的延遲後，該第一迴圈時段可例如小於或等於100皮秒、小於或等於200皮秒、小於或等於500皮秒、小於或等於1奈秒、小於或等於2奈秒、小於或等於5奈秒、或小於或等於10奈秒。

**【0277】** 作為比較，一 $M \times 1$ 向量與一 $M \times M$ 矩陣的相乘，由電子矩陣乘法單元進行運算的執行時間一般而言正比於 $M^2 - 1$ 個處理器時脈週期。當 $M=32$ 時，此一乘法運算將花費約1024個週期，在3 GHz時脈速度下的執行時間超過300奈秒，較ANN運算系統3200

的第一迴圈時段慢了數個數量級。

【0278】 在某些實施中，方法3300更包括一步驟，基於該第一轉換數位輸出向量產生一第二組調變器控制訊號。在某些種類的ANN運算中，單一數位輸入向量可重複通過同一ANN傳播或重複由同一ANN處理。如前文所述，實施多次通過(multi-pass)處理的ANN可稱為循環神經網路(RNN)。RNN為一神經網路，其中該網路在第k次通過該神經網路時的輸出被回授至該神經網路的輸入端，作為第(k+1)次通過的輸入值。RNN在組型辨識(pattern recognition)任務上可有各種應用，例如語音或手寫辨識。當該第二組調變器控制訊號產生後，方法3300可由步驟3340前進至步驟3360，以完成該第一數位輸入向量對該ANN的第二次通過。一般而言，將該轉換數位輸出回授作為數位輸入向量的動作可重複一預設數量的週期數，依該RNN在該ANN運算請求中接收到的特徵而定。

【0279】 在某些實施中，方法3300更包括一步驟，基於一第二組神經網路加權值產生一第二組加權值控制訊號。在某些情形中，該ANN運算請求更包括一第二組神經網路加權值。如前文所述，一般而言，一ANN除輸入層與輸出層外，尚具有一個或多個隱藏層。對具有二個隱藏層的ANN而言，該第二組神經網路加權值可對應於例如該ANN第一層與第二層之間的連結情形(connectivity)。為經由該ANN的該二隱藏層處理該第一數位輸入向量，該第一數位輸入向量首先可依據方法3300被處理直到步驟

3360為止，其中經由該ANN的第一隱藏層處理該第一數位輸入向量的結果被儲存於記憶單元120中。接著，控制器110重新配置OMM單元3220，以進行對應於該第二組神經網路加權值的矩陣乘法。其中該第二組神經網路加權值與該ANN的第二隱藏層關聯。當OMM單元3220被重新配置後，方法3300可基於該第一轉換數位輸出向量產生該組調變器控制訊號，該組調變器控制訊號產生一更新光學輸入向量，對應於該第一隱藏層的輸出。接著，該更新光學輸入向量由已重新配置、對應於該ANN第二隱藏層的OMM單元3220處理。一般而言，上述步驟可重複進行，直到該數位輸入向量已通過該ANN所有隱藏層的處理為止。

**【0280】** 在OMM單元3220的某些實施中，OMM單元3220的重新配置率可明顯慢於調變器陣列3208的調變率。在此等情況下，ANN運算系統3200的產出量將受到重新配置OMM單元3220所花費時間的負面影響，在該時間中ANN運算將無法進行。為減低OMM單元3220相對較慢的重新配置時間所造成的影響，可使用批量(batch)處理技術，其中二個或更多數位輸入向量通過OMM單元3220傳播而不須改變配置，以將該重新配置時間分攤在大量數位輸入向量之中。

**【0281】** 參見第39圖，在某些實施中，一波長分波多工(WDM)人工神經網路(ANN)運算系統3500包括一光電處理器3510，該光電處理器3510包括一OMM單元3520，該OMM單元3520具有例如第19圖至第37圖所示的複製模組、乘法模組及加法

模組，使處理矩陣運算時得以處理非同調或低度同調的光學訊號，其中該等光學訊號以多種波長被編碼。WDM ANN運算系統3500與ANN運算系統3200相似，除了WDM技術的使用以外，其中在ANN運算系統3500的某些實施中，光源3230被配置為產生多種波長，例如 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ ，與第6圖中的系統104相似。

【0282】 該等波長最好以一足夠大的波長間隔分開，以使多工及解多工至一共同傳播通道的動作容易進行。例如，該波長間隔大於0.5奈米、1.0奈米、2.0奈米、3.0奈米或5.0奈米時，可使多工及解多工容易進行。另一方面，該等波長中最短波長與最長波長之間的範圍(「WDM頻寬」)最好足夠小，使OMM單元3520的特徵或效能在該等波長之間大致上維持相同。光學部件一般而言具有色散性(dispersive)，意指其光學特徵隨波長以一函數改變。例如，MZI的功率分離比(power splitting ratio)可隨波長改變。然而，藉由將OMM單元3520設計為具有足夠大的運作波長窗口(operating wavelength window)，以及藉由將波長限制於該運作波長窗口內，由OMM單元3520輸出的光學輸出向量在每一波長下皆可為該OMM單元3520實施的矩陣乘法的足夠精確的結果。例如，該運作波長窗口可為1奈米、2奈米、3奈米、4奈米、10奈米或20奈米。

【0283】 WDM ANN運算系統3500的調變器陣列144包括光學調變器集合，被配置以產生多個光學輸入向量，每一該等集合對應該等多個波長中之一，並產生個別的光學輸入向量，分別具有個

別的波長。例如，對具有長度為32及3個波長(例如 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ )的光學輸入向量的系統而言，調變器陣列144可具有3個光學調變器集合，每一集合包括32個調變器。更進一步地，調變器陣列144亦包括光學多工器，被配置以合併該等光學輸入向量為一合併光學輸入向量，包括該等波長。例如，該光學多工器可對該光學輸入向量的每一元素合併該三調變器集合的不同波長輸出至單一傳播通道(例如一波導)中。因此，在上述範例中，該合併光學輸入向量將具有32個光學訊號，每一訊號包含3個波長。

**【0284】** WDM ANN運算系統3500中的光電處理部件更進一步被配置以對該等波長進行解多工，並產生多個解多工輸出電訊號。參見第40圖，光電矩陣乘法單元3520包括多個光徑1803，被配置以自調變器陣列144接收包括該等波長的合併光學輸入向量。例如，光徑1803\_1接收波長為 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的合併光學輸入向量元素 $v_1$ 。波長為 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的光學輸入向量元素 $v_1$ 複本被提供至乘法模組3530\_11、3530\_21、...、3530\_m1。在該等乘法模組3530輸出電訊號的某些實施中，乘法模組3530\_11輸出三個代表 $M_{11} \cdot v_1$ 的電訊號，在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_1$ 。乘法模組3530\_11在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_1$ 的輸出電訊號分別以 $(\lambda_1)$ 、 $(\lambda_2)$ 及 $(\lambda_3)$ 表示。相似符號亦用於其他乘法模組的輸出。乘法模組3530\_21輸出三個代表 $M_{21} \cdot v_1$ 的電訊號，分別在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_1$ 。乘法模組3530\_m1輸出三個代表 $M_{m1} \cdot v_1$ 的電訊號，在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_1$ 。

【0285】 波長為 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的光學輸入向量元素 $v_2$ 複本被提供至乘法模組3530\_12、3530\_22、...、3530\_m2。乘法模組3530\_12輸出三個代表 $M_{12} \cdot v_2$ 的電訊號，在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_2$ 。乘法模組3530\_22輸出三個代表 $M_{22} \cdot v_2$ 的電訊號，在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_2$ 。乘法模組3530\_m2輸出三個代表 $M_{m2} \cdot v_2$ 的電訊號，在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_2$ 。

【0286】 波長為 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的光學輸入向量元素 $v_n$ 複本被提供至乘法模組3530\_1n、3530\_2n、...、3530\_mn。乘法模組3530\_1n輸出三個代表 $M_{1n} \cdot v_n$ 的電訊號，在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_n$ 。乘法模組3530\_2n輸出三個代表 $M_{2n} \cdot v_n$ 的電訊號，在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_n$ 。乘法模組3530\_mn輸出三個代表 $M_{mn} \cdot v_n$ 的電訊號，在波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 對應輸入向量元素 $v_n$ 。以此類推。

【0287】 例如，每一該等乘法模組3530可包括解多工器，被配置以對包含於該多波長光學向量的32個訊號中每一訊號的三個波長進行解多工，並將該三單一波長光學輸出向量路由至三個光感測器集合(例如第23圖中的光感測器2012及2016，或第24圖中的2042及2046)，其中該三光感測器集合耦接至三個運算放大器或轉阻放大器(例如第23圖中的運算放大器2030，或第24圖中的運算放大器2050)集合。

【0288】 三個加法模組1808集合，接收來自乘法模組3530的輸出，並產生總和 $y$ ，對應於不同波長的輸入向量。例如，三個加



法模組1808\_1接收乘法模組3530\_11、3530\_12、...、3530\_1n的輸出，並產生總和 $y_1(\lambda_1)$ 、 $y_1(\lambda_2)$ 及 $y_1(\lambda_3)$ ，分別對應於波長為 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的輸出向量元素 $y_1$ ，其中在每一波長下的總和 $y_1$ 等於 $M_{11}v_1 + M_{12}v_2 + \dots + M_{1n}v_n$ 。三個加法模組1808\_2接收乘法模組3530\_21、3530\_22、...、3530\_2n的輸出，並產生總和 $y_2(\lambda_1)$ 、 $y_2(\lambda_2)$ 及 $y_2(\lambda_3)$ ，分別對應於波長為 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的輸出向量元素 $y_2$ ，其中在每一波長下的總和 $y_2$ 等於 $M_{21}v_1 + M_{22}v_2 + \dots + M_{2n}v_n$ 。三個加法模組1808\_m接收乘法模組3530\_m1、3530\_m2、...、3530\_mn的輸出，並產生總和 $y_m(\lambda_1)$ 、 $y_m(\lambda_2)$ 及 $y_m(\lambda_3)$ ，分別對應於波長為 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的輸出向量元素 $y_m$ ，其中在每一波長下的總和 $y_m$ 等於 $M_{m1}v_1 + M_{m2}v_2 + \dots + M_{mn}v_n$ 。

**【0289】** 參見第39圖，WDM ANN運算系統3500的ADC單元160包括ADC集合，被配置以對光電矩陣乘法單元3520的解多工輸出電壓進行轉換。每一該等集合對應該等波長中之一，並產生個別的數位化解多工輸出。例如，該等ADC 160集合可耦接至該等加法模組1808集合。

**【0290】** 控制器110可實施一方法，類似於第4圖中的方法200，但予以擴充，以支援多波長運算。例如，該方法可包括下列步驟：自ADC單元160獲取多個數位化解多工輸出，該等數位化解多工輸出形成多個第一數位輸出向量，其中每一該等第一數位輸出向量對應該等波長之一；對每一該等第一數位輸出向量進行非線性轉換，以產生多個轉換第一數位輸出向量；以及將該等轉換第一數

位輸出向量儲存於記憶單元中。

【0291】 在某些情況下，該ANN可以特定方式設計，且該等數位輸入向量可以特定方式形成，使乘法模組3530的多波長乘積可在不須進行解多工的情形下進行相加。在此等情況下，乘法模組3530可為波長不敏感乘法模組，不對該等多波長乘積的多個波長進行解多工。因此，乘法模組3530中的每一光感測器可有效地將一光學訊號中的多個波長加總為一光電流，且乘法模組3530的每一電壓輸出對應一向量元素與一矩陣元素乘積在該等波長下的總和。加法模組1808(僅需一個集合)輸出該等數位輸入向量的矩陣乘法運算結果的逐項和(element-by-element sum)。

【0292】 第41圖顯示一系統配置3500的範例，用於實施分波多工光電矩陣乘法單元3520，以使用 $2 \times 2$ 矩陣進行向量-矩陣乘法運算，其中加法運算於電領域進行。在此範例中，輸入向量為 $\vec{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$ ，矩陣為 $\bar{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ 。在此範例中，輸入向量具有多個波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ ，且輸入向量的每一元素被編碼在不同光學訊號上。二個不同的複製模組1902進行光學複製運算，以將運算分配至不同路徑中(例如一「上方」路徑及一「下方」路徑)。四個乘法模組1904，每一乘法模組使用光學振幅調變將一輸入向量元素與不同矩陣元素相乘。每一乘法模組1904的輸出提供予一解多工器及光感測模組3501的一集合，將一分波多工光學訊號轉換為與波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 關聯的電流形式電訊號。不同輸入向量元素的上方路徑以關聯於波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的一加法模組3503集合合併，而不同輸入向量元素的

下方路徑以關聯於波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 及 $\lambda_3$ 的一加法模組3503集合合併，其中該等加法模組3503在電領域進行加法運算。因此，該輸出向量在每一波長下的每一元素被編碼在不同電訊號上。如第41圖所示，隨著運算的進行，輸出向量的每一部分逐漸產生，以對每一波長在上方路徑及下方路徑分別得出下列結果。

$$M_{11}v_1 + M_{12}v_2$$

$$M_{21}v_1 + M_{22}v_2$$

**【0293】** 系統配置3500可使用多種光電技術中的任一種實施。在某些實施中，具有一共同基板(例如半導體，例如矽)，可支援積體電路光學部件及電子部件。該等光徑可以一折射率較高的材料被一折射率較低的材料包圍的波導結構所定義的波導實施，用以傳播攜帶光學訊號的光波。該等電路徑可以一導體材料實施，用以傳播攜帶電訊號的電流。(在第41圖中，代表該等路徑的線段粗細度乃用以區別光徑(以粗線表示)及電路徑(以細線或虛線表示)。)光學裝置(例如分光器及光學振幅調變器)及電子裝置(例如光感測器及運算放大器)可在同一基板上製造。或者，具有不同基板的不同裝置可被用於實施該系統中的不同部分，且該等裝置可經由通訊通道相互通訊。例如，可使用光纖提供通訊通道，以在用於實施整體系統的多個裝置之間傳送光學訊號。該等光學訊號可代表一輸入向量在進行向量-矩陣乘法時所提供的不同子集合，及／或進行向量-矩陣乘法時所計算出的中間結果的不同子集合，如下文所述。

【0294】 多種替代的系統配置或訊號處理技術可用於本說明書中所述的不同系統、子系統及模組的多種實施。

【0295】 在某些實施例中，可將部分或全部VMM子系統以替代子系統替換，包括使用以不同方式實施的各個複製模組、乘法模組及／或加法模組的子系統。例如，一VMM子系統可包括本說明書中敘述的光學複製模組及電加法模組，但將乘法模組替換為在電領域而非光學領域進行乘法運算的子系統。在此等範例中，光學振幅調變器陣列可替換為感測器陣列，用以將光學訊號轉換為電訊號，其後接續一電子子系統(例如ASIC、處理器或SoC)。可選地，若光學訊號走線是提供給被配置為感測光學訊號的加法模組使用，則該電子子系統可包括電-光轉換，例如使用電調變光源陣列進行。

【0296】 在某些實施例中，可對用於部分或全部VMM運算的部分或全部光學訊號使用單一波長。或者，在某些實施例中，為幫助減少所需的光學輸入埠數量，一輸入埠可接收多工光學訊號，該多工光學訊號具有不同數值，編碼於具有不同波長的不同光波上。接著，此等光波可在系統中的適當位置被分離，依複製模組、乘法模組及／或加法模組是否被配置為多波長運作而定。然而，即使在多波長實施例中，亦可對不同光學訊號子集合使用相同波長，例如在同一VMM子系統中使用者。

【0297】 在某些實施例中，可使用累加器(accumulator)對各模組接收的光學訊號及電訊號進行時間領域編碼，減低對電子電路在大量不同功率等級下高效運作的需求。例如，以二元(開-關)振幅

調變編碼、在每一訊符(symbol)的N個時隙(time slots)具有特定工作週期(duty cycle)的訊號，在該訊號通過累加器(類比電子累加器，將電訊號的電流或電壓進行積分運算)後，可被轉換為每一訊符具有N個振幅等級的訊號。因此，若該等光學裝置(例如光學振幅調變器中的相位調變器)可在一訊符頻寬B下運作，則其亦可在訊符頻寬 $B/100$ 下運作，其中每一訊符值使用 $N=100$ 個時隙。50%的積分振幅具有50%的工作週期(例如前50個時隙位於非零的「開」等級，後50個時隙位於零或接近零的「關」等級)，而10%的積分振幅具有10%的工作週期(例如前10個時隙位於非零的「開」等級，後90個時隙位於零或接近零的「關」等級)。在本說明書敘述的範例中，此一累加器可置於VMM子系統內每一電訊號路徑上的任何位置，惟相對於每一電訊號的置放位置必須一致，例如該VMM子系統內每一電訊號的加法模組之前，或該VMM子系統內每一電訊號的加法模組之後。該VMM子系統亦可被配置為在保持不同訊符的校準(alignment)的不同電訊號之間無明顯相對時間位移。

**【0298】** 參見第42圖，在某些實施中，可使用同差偵測(homodyne detection)以獲取調變訊號的相位及振幅。同差偵測器4000包括分光器4002，其中該分光器4002包括 $2 \times 2$ 多模干涉(MMI)耦合器、二個光感測器4004a及4004b、及減法器4006。分光器4002接收輸入訊號 $E_1$ 及 $E_2$ ，分光器4002的輸出由光感測器4004a及4004b感測。例如，輸入訊號 $E_1$ 可為將被感測的訊號，而輸入訊號 $E_2$ 可由一具有恆定雷射功率的區域性振盪器產生。分光器

4002在區域性振盪器訊號 $E_2$ 與輸入訊號 $E_1$ 被光感測器4004a及4004b感測前，將 $E_2$ 與 $E_1$ 混合。減法器4006輸出光感測器4004a及4004b的輸出之間的差值。減法器4006的輸出4008與 $|E_1||E_2|\sin(\theta)$ 成正比，其中 $|E_1|$ 及 $|E_2|$ 為二個輸入光場的振幅、 $\theta$ 為其相對相位。由於該輸出與二個光場的乘積相關，因此其可感測極微弱的光學訊號，甚至可達單一光子等級。

【0299】 例如，同差偵測器4000可用於第1、6、19-38、39-41圖所示的系統。同差偵測器4000對該訊號提供增益，進而具有較佳的訊噪比(signal-noise ratio)。對同調系統而言，同差偵測器4000更藉由感測結果的極性(polarity)訊息，提供揭露訊號相位資訊的額外優點。

【0300】 在第21圖的範例中，系統1920包括 $2 \times 2$ 矩陣，其中二個輸入向量元素被編碼在使用二個不同個別波長 $\lambda_1$ 及 $\lambda_2$ 的二個光學訊號上。該二光學訊號可使用例如二個光纖提供予系統1920。例如，一個對 $4 \times 4$ 矩陣進行矩陣處理的系統可接收由四個光纖所攜帶的四個輸入光學訊號。儘管對處理較大矩陣的系統可使用較多光纖以攜帶較多輸入光學訊號，然而由於光纖與光電晶片間的耦接會佔用相當大的空間，因此將大量光纖耦接至一光電晶片實屬困難。

【0301】 一種將攜帶光學訊號至一光電晶片所需光纖數量減少的方式，是使用波長分波多工。多個具有不同波長的光學訊號可被多工並使用單一光纖傳輸。例如，參見第43圖，在運算系統4100中，波長為 $\lambda_1$ 的第一光訊號4102被第一調變器4104調變，以產生

第一調變光學訊號4120，代表第一輸入向量元素 $V_1$ 。波長為 $\lambda_2$ 的第二光訊號4106被第二調變器4108調變，以產生第二調變光學訊號4122，代表第二輸入向量元素 $V_2$ 。該第一及第二調變光學訊號由多工器4110合併，以產生一波長分波多工訊號，經由光纖4112傳輸至光電晶片4114，其中該光電晶片4114包括多個矩陣乘法模組，例如4116a、4116b、4116c及4116d(統稱為4116)與4118a、4118b、4118c及4118d(統稱為4118)。

**【0302】** 在光電晶片4114內，該波長分波多工訊號由解多工器4150解多工，以分離光學訊號4120及4122。在此範例中，光學訊號4120由複製模組4152複製，以產生傳送至矩陣乘法模組4116a及4118a的光學訊號複本。光學訊號4122由複製模組4154複製，以產生傳送至矩陣乘法模組4116b及4118b的光學訊號複本。矩陣乘法單元4116a及4116b的輸出由一光學耦合器4120a合併，且該合併訊號被光感測器4122a感測。

**【0303】** 波長為 $\lambda_1$ 的第三光訊號4124被第三調變器4128調變，以產生第三調變光學訊號4132，代表第三輸入向量元素 $V_3$ 。波長為 $\lambda_2$ 的第四光訊號4126被第四調變器4130調變，以產生第四調變光學訊號4134，代表第四輸入向量元素 $V_4$ 。該第三及第四調變光學訊號由多工器4136合併，以產生一波長分波多工訊號，經由光纖4138傳輸至光電晶片4114。

**【0304】** 在光電晶片4114內，由光纖4138提供的波長分波多工訊號由解多工器4140解多工，以分離光學訊號4132及4134。在

此範例中，光學訊號4132由複製模組4142複製，以產生傳送至矩陣乘法模組4116c及4118c的光學訊號複本。光學訊號4134由複製模組4144複製，以產生傳送至矩陣乘法模組4116d及4118d的光學訊號複本。矩陣乘法單元4116c及4116d的輸出由一光學耦合器4120b合併，且該合併訊號被光感測器4122b感測。矩陣乘法單元4118a及4118b的輸出由一光學耦合器合併，且該合併訊號被一光感測器感測。矩陣乘法單元4118c及4118d的輸出由一光學耦合器合併，且該合併訊號被一光感測器感測。

**【0305】** 在某些範例中，一多工器可將具有三個或更多(例如10或100)波長的光學訊號進行多工，以產生一波長分波多工訊號，由單一光纖傳輸，且該光電晶片內的一解多工器可對該波長分波多工訊號進行解多工，以分離該等具有不同波長的訊號。此一配置可使更多光學訊號經由該等光纖並列傳遞至該光電晶片，增加了該光電晶片的資料處理產出量。

**【0306】** 在某些範例中，第1圖中的雷射單元142包括單一雷射，提供一光波，可被不同光學訊號調變。在此情況下，系統中各波導內的光波具有大致上互相相等的共同波長，其誤差在該雷射的譜線寬度(line width)解析度之內。例如，該等光波之間的波長誤差可小於1奈米。然而，雷射單元142亦可包括多個雷射，使用被調變至不同個別光波(例如每一光波的譜線寬度為1奈米或更小)上的不同光學訊號，使波長分波多工操作得以進行。該等不同光波的波長峰值可以大於該等個別雷射的譜線寬度的波長距離互相分離(例



如以大於1奈米的波長距離互相分離)。在某些範例中，波長分波多工系統可使用被調變至彼此之間的波長距離為數奈米(例如3奈米或更大)的光波上的光學訊號進行。然而，若該解多工器具有較佳解析度，則該WDM系統中不同波長之間的差值亦可小於3奈米。

**【0307】** 第44圖為一示意圖，顯示第1圖及第6圖中OMM單元150的一範例。OMM單元150可包括一輸入波導152陣列，以接收該光學輸入向量；一光學干涉單元154，與該輸入波導152陣列進行光學通訊；及一輸出波導156陣列，與光學干涉單元154進行光學通訊。光學干涉單元154將該光學輸入向量線性轉換為一光學訊號第二陣列。該輸出波導156陣列引導光學干涉單元154輸出的光學訊號第二陣列。該輸入波導152陣列中至少一輸入波導與該輸出波導156陣列中的每一輸出波導經由光學干涉單元154進行光學通訊。例如，對一長度為N的光學輸入向量而言，OMM單元150可包括N個輸入波導152及N個輸出波導156。

**【0308】** 光學干涉單元154可包括多個相互連結的Mach-Zehnder干涉儀(MZI)。第45圖及第46圖為示意圖，顯示相互連結的MZI的範例配置157及158。該等MZI可以多種方式相互連結，例如配置157及158中所示者，以達成對經由輸入波導152陣列接收的光學輸入向量的線性轉換。該等MZI可使用第2圖及第7-16圖中所示的範例實施。

**【0309】** 在第7-16圖所示的範例中，每一MZI包括二個平衡臂3904a及3904b。當該等移相器(例如第7圖中的3906及第8-11

圖、第15圖、第16圖中的3956)不施加光學相位移至在臂3904a及3904b中傳播的光波時，在該二平衡臂3904a及3904b中傳播的光波在多模干涉耦合器(MMI<sub>1×2</sub>)3902b中合併時，應形成相長干涉。然而，由於製造誤差，該二臂3904a及3904b可能施加不同量值的光學相位移至在臂3904a及3904b中傳播的光波，導致自多模干涉耦合器3902b輸出的訊號具有誤差。此一失準情形可經由使用校正移相器予以補償。

【0310】 第47圖為一示意圖，顯示具有片段式設計的MZI調變器4700，包括校正移相器4702a及4702b(統稱為4702)，可補償MZI調變器4700二臂間的不平衡情形。具有片段式設計的MZI調變器4700包括輸入波導4704、輸出波導4706、輸入1×2 MMI分離器4708、輸出1×2 MMI分離器4710、上方臂波導4712a、下方臂波導4712b、及多個電光移相器4714a、4714b、4714c、4714d、4714e、4714f、4714g及4714h(統稱為4714)。

【0311】 在系統運作時，光波從輸入波導4704傳播至1×2 MMI分離器4708，該分離器4708產生二個光波部分。每一光波部分受影響於該等電光移相器4714，隨後該二光波部分於1×2 MMI 4710合併以產生干涉，使輸出波導4706處的光強度關聯於二臂4712a及4712b之間的相對相位差。例如，該等調變移相器4714可由多個開-關電控制訊號驅動，其中該等控制訊號由覆晶(flip chip)電路產生。經由實施不同波長的移相器4714，輸出光波可經由數個二元開-關鍵移(keying)數位輸入，對多個等級的電訊號進行編碼。

【0312】 上方臂波導4712a及下方臂波導4712b可能因製造過程的誤差而具有不同波導長度，且此一波導長度差異所導致的相位差將沿著傳播方向在二臂間累積，導致該二臂4712a及4712b之間的初始相位落差可能使該MZI的初始運作點遠離相長干涉。此外，該等電光移相器4714可能在製造過程中遭遇光罩錯位(mask misalignment)，此情形亦會導致該二臂4712a及4712b之間產生初始相位差。該二校正移相器4702a及4702b乃用以抵銷製造過程導致的相位落差。

【0313】 例如，該等校正移相器4702可以熱光相位效應(thermos-optic phase effect，其運作為經由加熱波導以改變折射率)或電光效應(electro-optic effect，其運作為經由施加一電場以改變載子分布，以影響折射率)實施。例如，該等校正移相器4702由二個低速DAC獨立控制，其中該等DAC經由覆晶或打線(wire bonding)封裝至包括MZI 4700的光電晶片上。

【0314】 例如，可使用波導分接頭(tap)以引導輸出波導4706處的光訊號的一部分至一監控光感測器，該監控光感測器可提供一回授訊號，以表示在輸出波導4706中傳播的光波強度。為校正MZI 4700，將該等移相器4714以零訊號驅動，使該上方臂及下方臂中的光波部分的任何相位落差皆是由該上方臂及下方臂中的波導4712a及4712b的差距所導致的。基於該監控光感測器提供的回授訊號，施加至該等校正移相器4702a及4702b的控制訊號會被調整，使來自該上方臂及下方臂、到達輸出1×2 MMI分離器4710的

該等光波部分具有相同相位，並產生相長干涉。

【0315】 該上方臂及下方臂之間的相位差可能受到環境溫度影響，而環境溫度可能隨時間變動，故該監控光感測器的測量會定期進行，且施加至該等校正移相器4702的控制訊號亦會定期更新，例如每數分之一秒一次、每一秒一次、每10秒一次、或每一分鐘一次。該等校正移相器4702被配置為可補償該二臂間的相位落差，其範圍自0至 $2\pi$ 弧度。由於施加至該等校正移相器4702的控制訊號可以一低頻率(例如10Hz或更低)進行更新，故可使用高精度多等級DAC以產生控制訊號，以控制該等校正移相器4702。

【0316】 參見第48圖，在某些實施中，在MZI 4700的下方臂中，電光移相器4714e、4714f、4714g及4714h分別由驅動電路3966e、3966f、3966g及3966h驅動。校正移相器4702b可由一驅動電路4716b驅動，該驅動電路4716b可相似於該等驅動電路3966。例如，該等驅動電路3966e、3966f、3966g及3966h可分別由高速1位元DAC 4718e、4718f、4718g及4718h所提供的控制訊號驅動。驅動電路4716b(用於校正移相器4702b)可由一低速多位元DAC 4720b所提供的控制訊號驅動。在上方臂中，電光移相器4714a、4714b、4714c及4714d及校正移相器4702a可分別以相似於電光移相器4714e、4714f、4714g及4714h與校正移相器4702b的方式控制。

【0317】 參見第49圖，在某些實施中，MZI 4800包括位於上方臂的電光移相器4714a、4714b、4714c及4714d，及位於上方臂

與下方臂的校正移相器4702a及4702b。在某些範例中，一MZI可於上方臂具有電光移相器4714a、4714b、4714c及4714d，於下方臂具有電光移相器4714e、4714f、4714g及4714h，並於上方臂具有校正移相器4702a，而於下方臂不具有另一校正移相器。

【0318】 一般而言，該等用於將數位電訊號轉換為類比光學訊號的電光移相器可置於該MZI的單一臂中、或該MZI的二臂中。該MZI可包括置於單一臂中的單一校正移相器，或包括置於二臂中的二個校正移相器，以補償二臂之間的相位落差。一般而言，相較於將該等移相器置於該MZI的單一臂中，於該MZI的二臂中均配置移相器可使每一移相器具有較短的長度，因每一移相器僅需施加較少的光學相位移。

【0319】 例如，第8-16圖及第47-49圖中使用片段式設計的調變器可用於第1圖、第6圖及第39圖中的調變器陣列144及第31-33圖中的調變器2302。若調變器陣列144使用具有片段式設計的調變器，則第一MC子單元132將被改良，因其不需要多位元數位-類比轉換器。在此情況中，第一MC子單元132包括電路，用於將來自控制器110的數位輸入值轉換為合適的電壓訊號，施加於該調變器的各片段(此一配置可視為等效於一1位元DAC)。對該等光學調變器使用此一片段式設計的一個優點，在於經由除去第一MC子單元132中的數位-類比轉換器，可對一給定資料傳輸率(data rate)降低功率消耗，或對一給定功率消耗提升資料傳輸率。使用基於順向偏壓PIN二極體結構以使用載子注入對波導片段的折射率進行調變的調

變器的一個優點，在於該等調變器相容於互補式金屬氧化物半導體 (CMOS) 技術。

【0320】 第50圖顯示調變器陣列5000的一範例，其具有第47圖所示的片段式設計光學調變器。調變器陣列5000進行與第1圖中的調變器陣列144相似的功能。在此範例中，調變器陣列5000被配置為處理一長度為4的數位輸入向量，該數位輸入向量包括四個元素，且每一元素皆為一具有四個位元的數位值。調變器陣列5000包括四個具有片段式設計的光學調變器5002、5004、5006及5008，其中每一光學調變器皆包括四個子調變器或四個移相器。

【0321】 在此範例中，雷射單元142輸出四個光訊號至四個光波導4704a、4704b、4704c及4704d。位於光波導4704a的光訊號由光學調變器5002依據該數位輸入向量的第一4位元值調變。位於光波導4704b的光訊號由光學調變器5004依據該數位輸入向量的第二4位元值調變。位於光波導4704c的光訊號由光學調變器5006依據該數位輸入向量的第三4位元值調變。位於光波導4704d的光訊號由光學調變器5008依據該數位輸入向量的第四4位元值調變。

【0322】 光學調變器5002包括二個 $1\times 2$ 埠多模干涉耦合器 (MMI $_{1\times 2}$ ) 4708a及4710a、二個平衡臂5012a及5012b、及八個子調變器：位於上方臂的5022a、5022b、5022c、5022d及位於下方臂的5022e、5022f、5022g、5022h。例如，每一子調變器可包括一移相器。子調變器5022d及5022h接收該輸入向量中第一數值的最低位元(B11)。子調變器5022c及5022g接收該輸入向量中第一

數值的第二位元(B12)。子調變器5022b及5022f接收該輸入向量中第一數值的第三位元(B13)。子調變器5022a及5022e接收該輸入向量中第一數值的最高位元(B14)。光學調變器5002亦包括由多位元DAC驅動的校正移相器5032a及5032b。

【0323】子調變器5022d包括一第一波導片段，子調變器5022c包括一第二波導片段，子調變器5022b包括一第三波導片段，子調變器5022a包括一第四波導片段。該第二波導片段的長度約為該第一波導片段的二倍，該第三波導片段的長度約為該第一波導片段的四倍，該第四波導片段的長度約為該第一波導片段的八倍。

【0324】相似地，子調變器5022h包括一第五波導片段，子調變器5022g包括一第六波導片段，子調變器5022f包括一第七波導片段，子調變器5022e包括一第八波導片段。該第六波導片段的長度約為該第五波導片段的二倍，該第七波導片段的長度約為該第五波導片段的四倍，該第八波導片段的長度約為該第五波導片段的八倍。

【0325】光學調變器5004包括二個 $1\times 2$ 埠多模干涉耦合器(MMI $_{1\times 2}$ )4708b及4710b、二個平衡臂5014a及5014b、及八個子調變器：位於上方臂的5024a、5024b、5024c、5024d及位於下方臂的5024e、5024f、5024g、5024h。例如，每一子調變器可包括一移相器。子調變器5024d及5024h接收該輸入向量中第二數值的最低位元(B21)。子調變器5024c及5024g接收該輸入向量中第二數值的第二位元(B22)。子調變器5024b及5024f接收該輸入向量中

第二數值的第三位元(B23)。子調變器5024a及5024e接收該輸入向量中第二數值的最高位元(B24)。光學調變器5004亦包括由多位元DAC驅動的校正移相器5034a及5034b。

【0326】 光學調變器5006及5008的配置與光學調變器5002及5004相似。

【0327】 光學調變器5002依據該數位輸入向量中第一數值的四個位元對輸入波導4708a中的光學訊號進行調變，並產生一類比光學訊號5042，代表該數位輸入向量的第一數值。光學調變器5002將該數位輸入向量的第一4位元值轉換為一第一類比光學訊號。光學調變器5004依據該數位輸入向量中第二數值的四個位元對輸入波導4708b中的光學訊號進行調變，並產生一類比光學訊號5044，代表該數位輸入向量的第二數值。光學調變器5004將該數位輸入向量的第二4位元值轉換為一第二類比光學訊號。

【0328】 光學調變器5006依據該數位輸入向量中第三數值的四個位元對輸入波導4708c中的光學訊號進行調變，並產生一類比光學訊號5046，代表該數位輸入向量的第三數值。光學調變器5006將該數位輸入向量的第三4位元值轉換為一第三類比光學訊號。光學調變器5008依據該數位輸入向量中第四數值的四個位元對輸入波導4708d中的光學訊號進行調變，並產生一類比光學訊號5048，代表該數位輸入向量的第四數值。光學調變器5008將該數位輸入向量的第四4位元值轉換為一第四類比光學訊號。類比光學訊號

5042、5044、5046、5048一同形成一類比光學輸入向量，可提供



至例如第1圖中的光電矩陣乘法單元150。

**【0329】** 本說明書中所敘述的數位控制器(例如用於控制第38圖中所示之部件者)及功能運作可以數位電子電路實施，或以電腦軟體、韌體或硬體實施，包括本說明書中揭露的結構及其等效結構，或上述各種實施方式之一或多者的結合。本說明書所敘述之標的(subject matter)的實施例，可使用一種或多種電腦程式指令模組實施，該(等)電腦程式指令模組編碼於電腦可讀媒體上，以由資料處理設備執行、或控制資料處理設備的運作。該電腦可讀媒體可為一大量製造之產品，例如電腦系統中的硬碟或經由零售管道販售的光碟，或一嵌入式系統。該電腦可讀媒體可單獨取得並於稍後被編碼一種或多種電腦程式指令模組，例如經由有線或無線網路傳送該(等)電腦程式指令模組。該電腦可讀媒體可為一機器可讀儲存裝置、一機器可讀儲存基板、一記憶裝置、或上述各種電腦可讀媒體之一或多者的結合。

**【0330】** 電腦程式(亦稱程式(program)、軟體(software)、軟體應用程式(software application)、腳本(script)或程式碼(code))可以任何形式的程式語言寫成，包括編譯語言(compiled language)或直譯語言(interpreted language)、敘述性語言(declarative language)或程序性語言(procedural language)，且其可以任何形式被配置，包括單獨程式或模組、部件、子常式(subroutine)或其他適合運算環境的單元。一電腦程式在檔案系統中並不需要對應到一檔案。電腦程式可儲存於一檔案中的一部分，

其中該檔案亦儲存其他程式或資料(例如一個或多個儲存於一標記式語言(markup language)文件中的腳本)、專用於所述程式的單一檔案、或多個協作的檔案中(例如儲存一個或多個模組、子程式或程式碼部分的多個檔案)。電腦程式可被配置以在一個或多個電腦上執行，其中該等多個電腦位於一處、或分布於多處，並以通訊網路彼此相連。

**【0331】** 本說明書中所敘述的程序及邏輯流程，可以一個或多個可程式化處理器執行一個或多個電腦程式進行，以經由對輸入資料進行運算並產生輸出來執行功能。該等程序及邏輯流程亦可以特定用途邏輯電路進行，且其設備亦可以特定用途邏輯電路實施，其中該等特定用途邏輯電路包括例如現場可程式化邏輯閘陣列(FPGA)或特定應用積體電路(ASIC)。

**【0332】** 本說明書中所敘述的各系統的部分背景資料揭露於美國專利申請案第16/431,167號，於2019年6月4日提交。該案特此併入參照文件。

**【0333】** 儘管本揭露的敘述與特定實施例連結，然而應注意，本揭露不應限於已揭露之實施例；反之，乃意圖涵蓋包含於附錄之請求項範圍的多種改良及等效結構，該範圍應符合法律許可下最寬廣之解釋，以包含所有該等改良及等效結構。

## **【符號說明】**

### **【0334】**

- 100: 人工神經網路(ANN)運算系統
- 102: 電腦
- 110: 控制器
- 120: 記憶單元
- 130: 調變器控制單元
- 132: 第一調變器控制(MC)子單元
- 134: 第二調變器控制(MC)子單元(第二數位-類比轉換器(DAC)子單元)
- 140: 光電處理器
- 142: 雷射單元
- 144: 調變器陣列
- 146: 類比電子單元
- 150: 光電矩陣乘法(OMM)單元
- 160: 類比-數位轉換器(ADC)單元
- 170: Mach-Zehnder干涉儀(MZI)
- 171: 第一輸入波導
- 172: 第二輸入波導
- 174: 第一移相器
- 176: 第二移相器
- 178: 第一輸出波導
- 179: 第二輸出波導
- 4400: 調變器電路
- 4402: 幫浦電容

- 4404: 控制電壓波形
- 4405: 反相器電路
- 4406: 驅動電壓波形
- 4408: 端點
- 4410: 端點
- 4412: 電流源
- 4414: 開關
- 4416: 電荷幫浦頻寬增加電路
- 200: 程序
- 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270: 步驟
- 290: 圖表
- 104: 人工神經網路(ANN)運算系統
- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ : 波長
- 3900: Mach-Zehnder調變器
- 3902a, 3902b: 1×2埠多模干涉耦合器(MMI<sub>1×2</sub>)
- 3904a, 3904b: 平衡臂
- 3906: 移相器
- 3908: 訊號線
- 3950: Mach-Zehnder調變器
- 3952a, 3952b: 1×2埠多模干涉耦合器(MMI<sub>1×2</sub>)
- 3954a, 3954b: 平衡臂
- 3956a, 3956b, 3956c, 3956d, 3956e, 3956f: 移相器

3964a: 第一脊狀波導

3964b: 第二脊狀波導

3960a, 3960c: 重摻雜 p+ 區域

3960b, 3960d: 重摻雜 n+ 區域

3962a, 3962c: 第一電極

3962b, 3962d: 第二電極

3968a, 3968c: 重摻雜 p+ 區域

3968b, 3968d: 重摻雜 n+ 區域

3970a, 3970c: 第三電極

3970b, 3970d: 第四電極

3972a, 3972c: 重摻雜 p+ 區域

3972b, 3972d: 重摻雜 n+ 區域

3974a, 3974c: 第五電極

3974b, 3974d: 第六電極

3966a, 3966b, 3966c, 3966d, 3966e, 3966f: 驅動電路

4404a, 4404b, 4404c: 控制電壓波形

4402a: 幫浦電容

4405a: 反相器電路

4410a: 端點

3980, 3990, 3995: MZI

4010: Mach-Zehnder 調變器

4012a, 4012b, 4012c: 數位-類比轉換器(DAC)

1700, 1702, 1704: 圖

1706: 頂板波形快速上升

1708: 頂板波形快速下降

3910: 圖表

1800: 光電運算系統

1802A, 1802B: 光埠 / 光源

1803: 光徑

1804A, 1804B: 複製模組

1806A, 1806B, 1806C, 1806D: 乘法模組

1808: 加法模組

1810A, 1810B: 訊號

1900: 系統配置

1902a, 1902b: 複製模組

1904a, 1904b, 1904c, 1904d: 乘法模組

1906a, 1906b, 1906c, 1906d: 光感測模組

1908a, 1908b: 加法模組

1920: 系統配置

1910a, 1910b: 光學結合器模組

1914a, 1914b: 輸入波導

1912a, 1912b: 光電加法模組

2000: 對稱差動配置

2002: 電流減法模組

- 2010: 電流
- 2012: 第一光電二極體感測器
- 2014: 電流
- 2016: 第二光電二極體感測器
- 2018: 接面
- 2020: 差值電流
- 2024: 端點
- 2026: 輸出端
- 2028: 電阻元件
- 2030: 運算放大器
- 2032: 共同端點
- 2040: 電流
- 2042: 第一光電二極體感測器
- 2044: 電流
- 2046: 第二光電二極體感測器
- 2050: 運算放大器
- 2052: 反相端
- 2054: 非反相端
- 2056: 輸出端
- 2100: 對稱差動配置
- 1902: 複製模組
- 1904: 乘法模組

- 1906: 光感測模組
- 2102: 電流減法模組
- 2110: 系統配置
- 2112: 複製模組
- 2114A, 2114B: 加法模組
- 2200: 1×2光學振幅調變器
- 2202: 輸入光分配器
- 2204: 相位調變器
- 2206: 2×2耦合器
- 2208a, 2208b: 輸出波導
- 2210: 對稱差動配置
- 2212, 2214: 光感測器
- 2216: 介面
- 2220: 對稱差動配置
- 2221: 輸入埠
- 2222: 環形諧振器
- 2224: 路徑
- 2226: 順時針路徑
- 2228: 路徑
- 2230: 對稱差動配置
- 2231: 輸入埠
- 2232, 2234: 環形諧振器



2236: 路徑

2238: 順時針路徑

2240: 逆時針路徑

2242: 路徑

2300A, 2300B, 2300C: 光電系統配置

2302A, 2302B: 光學振幅調變器

2303: 波導分配器

2306A, 2306B: 運算放大器

2310A, 2310B, 2310C: 向量-矩陣乘法器(VMM)子系統

2304a-2304h: 光波導

2308a, 2308b: 路徑

2400A, 2400B, 2400C, 2400D, 2400E: 系統配置

2402: 光埠或光源

2403: 光波導集合

2404: 複製模組

2405A, 2405B: 光波導集合

2410a, 2410b, 2410c, 2410d: 裝置

2414, 2414a, 2414b: 加法模組

2416a, 2416b: 電線

2410: VMM子系統

2416: 光纖束(波導集合)

2418: 輸出端

- 2420: 光學傳輸器陣列
- 2422: 光學接收器陣列
- 2424a, 2424b: 光學訊號子集合
- 2430: 光學開關
- 2440: 電開關
- 2450: 資料儲存子系統
- 2460: 輔助處理子系統
- 2462: 結果資料
- 3500: ANN 運算系統
- 3202: 調變器控制單元
- 3204: 第一DAC子單元
- 3206: 第二DAC子單元
- 3208: 調變器陣列
- 3230: 光源
- 3510: 光電處理器
- 3520: OMM單元
- 1803\_1, 1803\_2, 1803\_n: 光徑
- 3530\_11, 3530\_21... 3530\_mn: 乘法模組
- 1808\_1, 1808\_2, 1808\_m: 加法模組
- 3501: 光感測模組
- 3503: 加法模組
- 4000: 同差偵測器

- 4002: 分光器
- 4004a, 4004b: 光感測器
- 4006: 減法器
- 4008: 輸出
- 4100: 運算系統
- 4102: 第一光訊號
- 4106: 第二光訊號
- 4104: 第一調變器
- 4108: 第二調變器
- 4120: 第一調變光學訊號
- 4122: 第二調變光學訊號
- 4110: 多工器
- 4112: 光纖
- 4114: 光電晶片
- 4124: 第三光訊號
- 4126: 第四光訊號
- 4128: 第三調變器
- 4130: 第四調變器
- 4132: 第三調變光學訊號
- 4134: 第四調變光學訊號
- 4136: 多工器
- 4138: 光纖

4150, 4140: 解多工器

4152, 4154, 4142, 4144: 複製模組

4116a, 4116b, 4116c, 4116d: 矩陣乘法模組

4118a, 4118b, 4118c, 4118d: 矩陣乘法模組

4120a, 4120b: 光學耦合器

4122a, 4122b: 光感測器

152: 輸入波導

154: 光學干涉單元

156: 輸出波導

157, 158: 配置

4700: MZI調變器

4704: 輸入波導

4708: 輸入1×2多模干涉(MMI)分離器

4712a: 上方臂波導

4712b: 下方臂波導

4714a-4714h: 電光移相器

4702a, 4702b: 校正移相器

4710: 輸出1×2 MMI分離器

4706: 輸出波導

3966g, 3966h: 驅動電路

4716b: 驅動電路

4718e-4718h: 高速1位元DAC

4720b: 低速多位元DAC

4800: MZI

5000: 調變器陣列

5002, 5004, 5006, 5008: 光學調變器

4704a-4704d: 光波導

4708a-4708d: 1×2埠多模干涉耦合器(MMI<sub>1×2</sub>)

5012a, 5014a, 5016a, 5018a: 平衡臂

5012b, 5014b, 5016b, 5018b: 平衡臂

5022a-5022h, 5024a-5024h, 5026a-5026h, 5028a-5028h: 子  
調變器

B11, B21, B31, B41: 最低位元

B12, B22, B32, B42: 第二位元

B13, B23, B33, B43: 第三位元

B14, B24, B34, B44: 最高位元

5032a, 5032b, 5034a, 5034b, 5036a, 5036b, 5038a, 5038b: 校  
正移相器

4710a-4710d: 1×2埠多模干涉耦合器(MMI<sub>1×2</sub>)

5042, 5044, 5046, 5048: 類比光學訊號

3200: ANN運算系統

3210: 光電處理器

3220: OMM單元

1804\_1, 1804\_2, 1804\_n: 複製模組

1806\_11-1806\_mn: 乘法模組

3300: 程序(方法)

3310, 3320, 3330, 3340, 3350, 3360, 3370: 步驟

5400: 環形諧振器調變器

5402a: 第一光波導

5402b: 第二光波導

5402c: 封閉迴圈光波導

A, B, C: 埠

5404a: 第一移相器

5404b: 第二移相器

5406a: 第一電荷幫浦頻寬增加電路

5406b: 第二電荷幫浦頻寬增加電路

5408a, 5408b: 2位元DAC

## 【發明申請專利範圍】

【請求項1】 一種光電處理系統，包括：

至少一輸入光波導，被配置以接收一光波；

至少一數位輸入埠，被配置以在連續時間間隔接收一系列數位輸入值，每一該等數位輸入值包括二個或更多位元；以及

一光學調變器，耦接至該輸入光波導，該光學調變器包括：

一光波導部分，包括多個光波導片段，該等光波導片段關聯於多個沿該對應光波導片段佈設的二極體區段，以及

一訊號調節電路，被配置以形塑振幅改變於一電訊號，該電訊號施加於至少一該等二極體區段，該振幅改變關聯於該系列數位輸入值中連續的數位輸入值之間的一對應改變。

【請求項2】 如請求項1之系統，其中該訊號調節電路被配置為對一第二時間間隔的一初始部分，經由增加一第一電訊號位準與一第二電訊號位準之間的一振幅改變的幅度形塑該振幅改變，其中該第一電訊號位準關聯於一第一時間間隔，該第二電訊號位準關聯於該第二時間間隔。

【請求項3】 如請求項2之系統，其中該訊號調節電路被配置為對該第二時間間隔的一最後部分，經由減少該第一電訊號位準與該第二電訊號位準之間的一振幅改變的幅度形塑該振幅改變。

【請求項4】 如請求項1之系統，其中該訊號調節電路被配置為經由一匹配電路施加一電訊號至該二極體區段以形塑該振幅改變，該匹配電路被配置為與該二極體區段關聯的阻抗值匹配，而不明顯

改變該施加電訊號的振幅。

【請求項5】 如請求項4之系統，其中該匹配電路包括一被動電路。

【請求項6】 如請求項5之系統，其中該匹配電路基本上由一電感組成。

【請求項7】 如請求項1之系統，其中該訊號調節電路被配置為經由電路施加一電訊號至該二極體區段以形塑該振幅改變，該電路被配置為在該二極體區段及一電容之間抽送電流，該電容串聯於該二極體區段及提供該系列數位輸入值的一電路之間，其中由該被抽送電流轉移的電荷數量至少部分基於一電壓而決定，該電壓在該系列數位輸入值被提供的多個連續時間間隔中為恆定。

【請求項8】 如請求項1之系統，其中該光學調變器包括一干涉儀光學調變器，該干涉儀光學調變器更包括一光學干涉部分，被配置為提供一程度的相消光學干涉，造成一預設程度的振幅減低，該相消光學干涉程度基於與該等二極體區段關聯的光波導片段的累積調變貢獻而定。

【請求項9】 如請求項8之系統，其中該光學干涉部分包括一光學結合器。

【請求項10】 如請求項9之系統，其中該光學干涉部分包括：至少二個光波導臂，每一臂：接收來自耦接至該輸入光波導的同一分光器分離的一光波，並提供一光波至該光學結合器。

【請求項11】 如請求項10之系統，其中關聯於該二極體區段的



光波導片段的光學特性包括該光波導片段的有效折射率，且該等不同的個別調變貢獻包括不同的個別相位移。

【請求項12】 如請求項11之系統，其中關聯於一第一二極體區段的半導體二極體的一第一波導片段的光徑長約為關聯於一第二二極體區段的半導體二極體的一第二波導片段的光徑長的二倍。

【請求項13】 如請求項12之系統，其中該訊號調節電路被配置為藉由對該第一二極體區段的電接點施加一第一預設形態的電訊號振幅以回應一對應位元值自0至1的改變，以及對該第二二極體區段的電接點施加一第二預設形態的電訊號振幅以回應一對應位元值自1至0的改變，以形塑該振幅改變。

【請求項14】 如請求項12之系統，其中該訊號調節電路被配置為經由一第一匹配電路施加一電訊號至該第一二極體區段的電接點，該第一匹配電路被配置為與該第一半導體二極體關聯的阻抗匹配，以及經由一第二匹配電路施加一電訊號至該第二二極體區段的電接點，該第二匹配電路被配置為與該第二半導體二極體關聯的阻抗匹配，形塑該振幅改變。

【請求項15】 如請求項14之系統，其中該第一匹配電路及該第二匹配電路中每一電路基本上由一電感組成。

【請求項16】 如請求項10之系統，其中該輸入光波導耦接至一光學解多工器，該光學解多工器分離至少二個波長不同的光波。

【請求項17】 如請求項1之系統，其中該光學調變器包括一吸收光學調變器，被配置為提供一程度的吸光度，造成一預設程度的振

幅減低，該吸光度基於與該等二極體區段關聯的光波導片段的累積調變貢獻而定。

【請求項18】 如請求項17之系統，其中關聯於該二極體區段的光波導片段的光學特性包括該光波導片段的吸光度係數，且該等不同的個別調變貢獻包括不同的個別吸光度。

【請求項19】 如請求項1之系統，其中該至少一輸入光波導包括多個輸入光波導；多個光學調變器每一皆耦接至該等輸入光波導中不同的個別輸入光波導，且該等光學調變器的輸出被合併以提供向量-矩陣乘法運算的一運算結果。

【請求項20】 如請求項1之系統，其中該光學調變器包括至少一校正移相器，被配置以補償該光學調變器二個波導臂所施加的光學相位不平衡。

【請求項21】 如請求項1之系統，包括一人工神經網路(ANN)運算系統，該ANN運算系統包括：

一第一單元，被配置為產生多個調變器控制訊號，該等調變器控制訊號包括在連續時間間隔中的一系列數位輸入值，每一數位輸入值包括二個或更多位元；

一光源，被配置為提供多個光輸出；

多個光學調變器，耦接至該光源及該第一單元，該等光學調變器被配置為基於該等調變控制訊號調變該光源提供的該等光輸出以產生一光學輸入向量，該光學輸入向量包括多個光學訊號；

其中該等光學調變器包括包含該光波導部分及該訊號調節電路

的光學調變器；以及

一矩陣處理單元，耦接至該等光學調變器及該第一單元，該矩陣處理單元被配置為基於多個加權值控制訊號，將該光學輸入向量轉換為一類比輸出向量。

【請求項22】 如請求項21之系統，其中該ANN運算系統包括：

一第二單元，耦接至該矩陣處理單元，且被配置為將該類比輸出向量轉換為一數位化輸出向量；以及

一控制器，包括積體電路，被配置為進行運算，包括：

接收一人工神經網路運算請求，包括一輸入資料集，該輸入資料集包括一第一數位輸入向量；

接收一第一組神經網路加權值；以及

基於該第一數位輸入向量及一第一組加權值控制訊號，經由該第一單元產生一第一組調變器控制訊號，該第一組加權值控制訊號基於該第一組神經網路加權值產生。

【請求項23】 如請求項21之系統，其中該矩陣處理單元包括：

多個複製模組，其中每一該等複製模組對應至該光學輸入向量的一個或多個光學訊號的一子集合，且被配置為將該一個或多個光學訊號的子集合分配為該等光學訊號的二個或更多複本；

多個乘法模組，其中每一該等乘法模組對應至一個或多個光學訊號的一子集合，被配置為將該子集合中的一個或多個光學訊號以光學振幅調變與一個或多個矩陣元素值相乘；以及

一個或多個加法模組，其中每一加法模組被配置為產生一電訊

號，代表該等乘法模組中二個或更多乘法模組的運算結果的總和。

【請求項24】 如請求項1至23中任一者之系統，包括至少下列之一：一個人電腦、一伺服器電腦、一車載電腦、或一飛行電腦，其中該至少一輸入光波導、該至少一數位輸入埠、及該光學調變器為該個人電腦、該伺服器電腦、該車載電腦或該飛行電腦的部分。

【請求項25】 一種光電處理系統，包括：

一第一單元，被配置為產生一第一調變器控制訊號集合；

一第二單元，被配置為產生一第二調變器控制訊號集合，以及一處理器，包括：

一光源或光埠，被配置為提供多個光輸出，以及

一第一光學調變器集合，耦接至該光源或光埠及該第一單元；

該第一光學調變器集合中的光學調變器被配置為基於對應於該第一調變器控制訊號集合的數位輸入值調變該光源或光埠提供的該等光輸出產生一光學輸入向量，該光學輸入向量包括多個光學訊號；

該處理器亦包括一矩陣處理單元，該矩陣處理單元包括一第二光學調變器集合，該矩陣處理單元耦接至該第二單元，且被配置為基於多個數位加權值將該光學輸入向量轉換為一類比輸出向量，該等數位加權值對應於該第二調變器控制訊號集合；

至少一光學調變器，位於該第一光學調變器集合中，包括一第一光波導部分，該第一光波導部分包括多個二極體區段，沿該第一光波導部分佈設；

該等二極體區段被配置為基於該等數位輸入值中之一的不同個別單一位元，施加不同個別調變貢獻至經由該第一光波導部分傳播的一光波。

【請求項26】 如請求項25之系統，其中每一個別二極體區段包括一半導體二極體，被配置為在順向偏壓狀態下運作，其中該二極體區段的光學特性回應於該等數位輸入值中之一的一對應位元值被調變。

【請求項27】 如請求項25之系統，包括一訊號調節電路，被配置以形塑振幅改變於一電訊號，該電訊號施加於至少一該等半導體二極體，該振幅改變關聯於該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值之間的一對應改變。

【請求項28】 一種光電處理系統，包括：

一第一單元，被配置為產生一第一調變器控制訊號集合；

一第二單元，被配置為產生一第二調變器控制訊號集合，以及一處理器，包括：

一光源或光埠，被配置為提供多個光輸出，以及

一第一光學調變器集合，耦接至該光源或光埠及該第一單元；

該第一光學調變器集合中的光學調變器被配置為基於對應於該第一調變器控制訊號集合的數位輸入值調變該光源或光埠提供的該等光輸出產生一光學輸入向量，該光學輸入向量包括多個光學訊號；

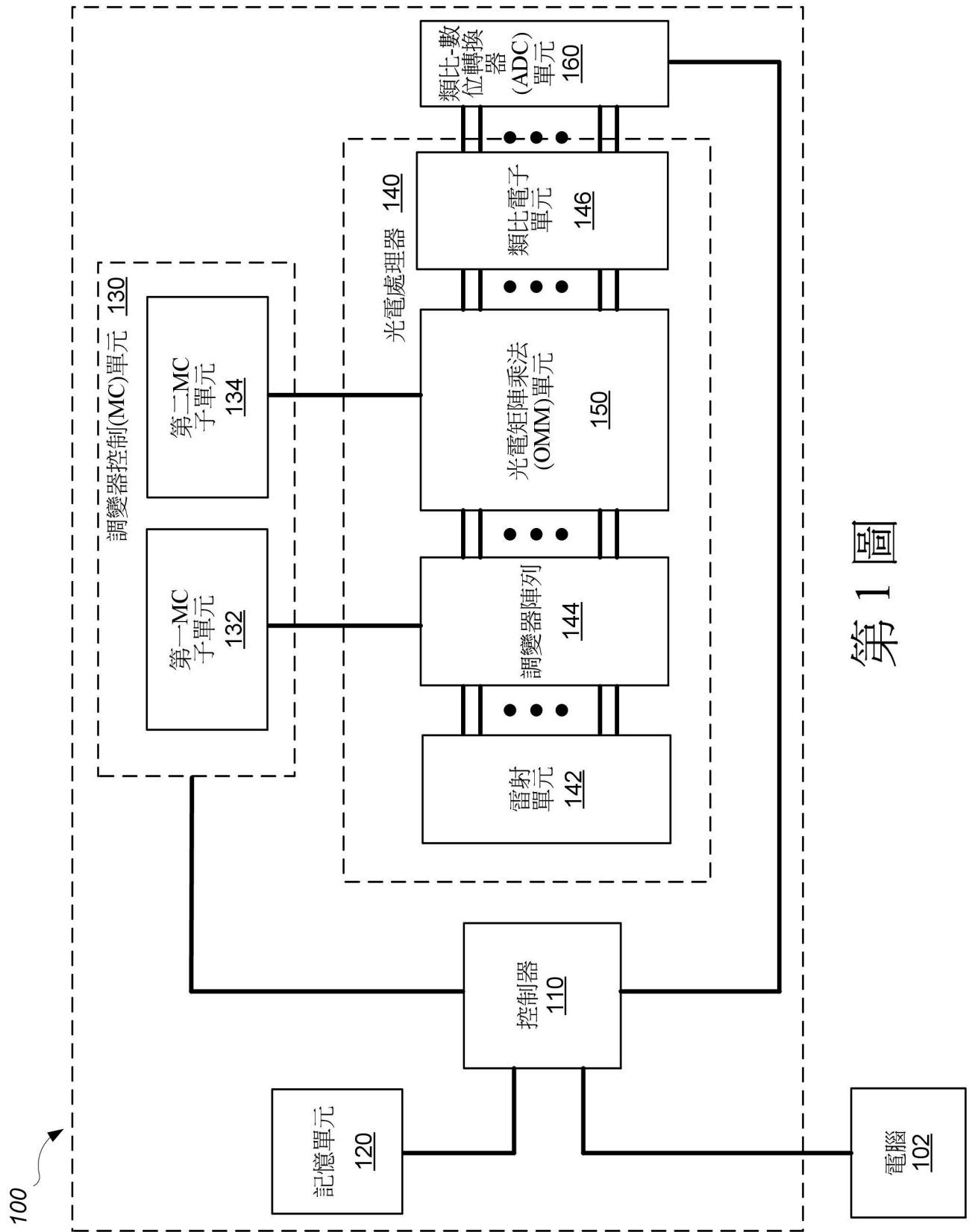
該處理器亦包括一矩陣處理單元，該矩陣處理單元包括一第二光學調變器集合，該矩陣處理單元耦接至該第二單元，且被配置為

基於多個數位加權值將該光學輸入向量轉換為一類比輸出向量，該等數位加權值對應於該第二調變器控制訊號集合；至少一光學調變器，位於該第二光學調變器集合中，包括一第二光波導部分，該第二光波導部分包括單一二極體區段，被配置為基於該等數位輸入值中之一的多個位元，施加一調變至經由該第二光波導部分傳播的一光波。

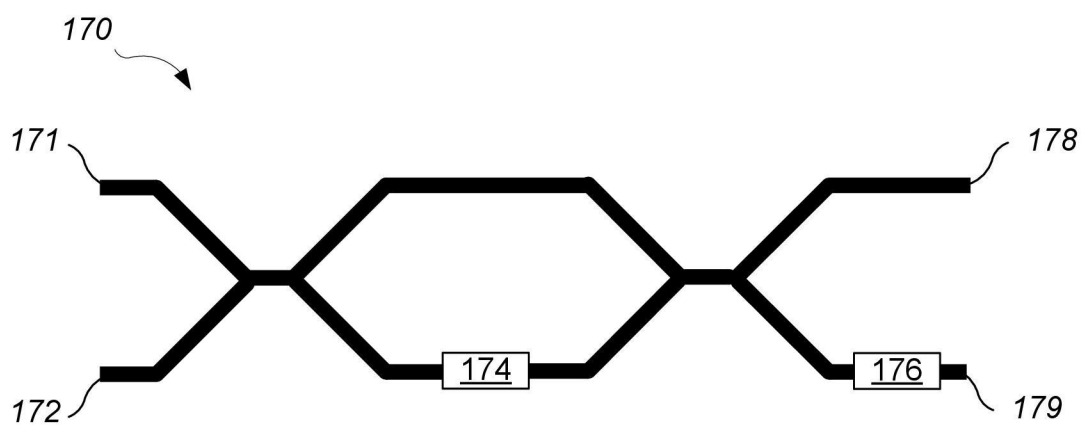
【請求項29】 如請求項28之系統，其中每一個別二極體區段包括一半導體二極體，被配置為在順向偏壓狀態下運作，其中該二極體區段的光學特性回應於該等數位輸入值中之一的一對應位元值被調變。

【請求項30】 如請求項29之系統，包括一訊號調節電路，被配置以形塑振幅改變於一電訊號，該電訊號施加於至少一該等半導體二極體，該振幅改變關聯於該一系列數位輸入值中連續的數位輸入值之間的一對應改變。

【發明圖式】

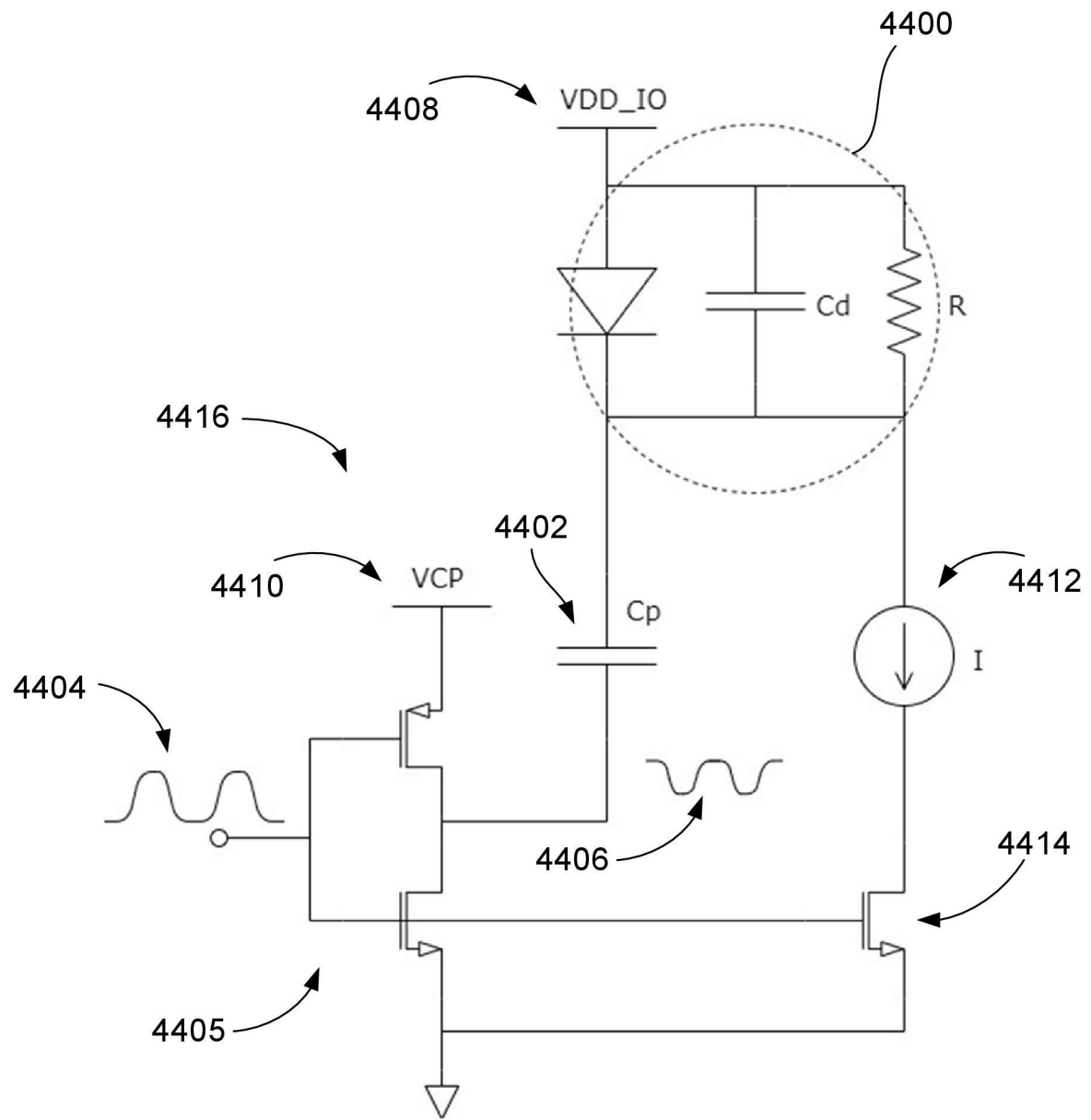


第 1 圖

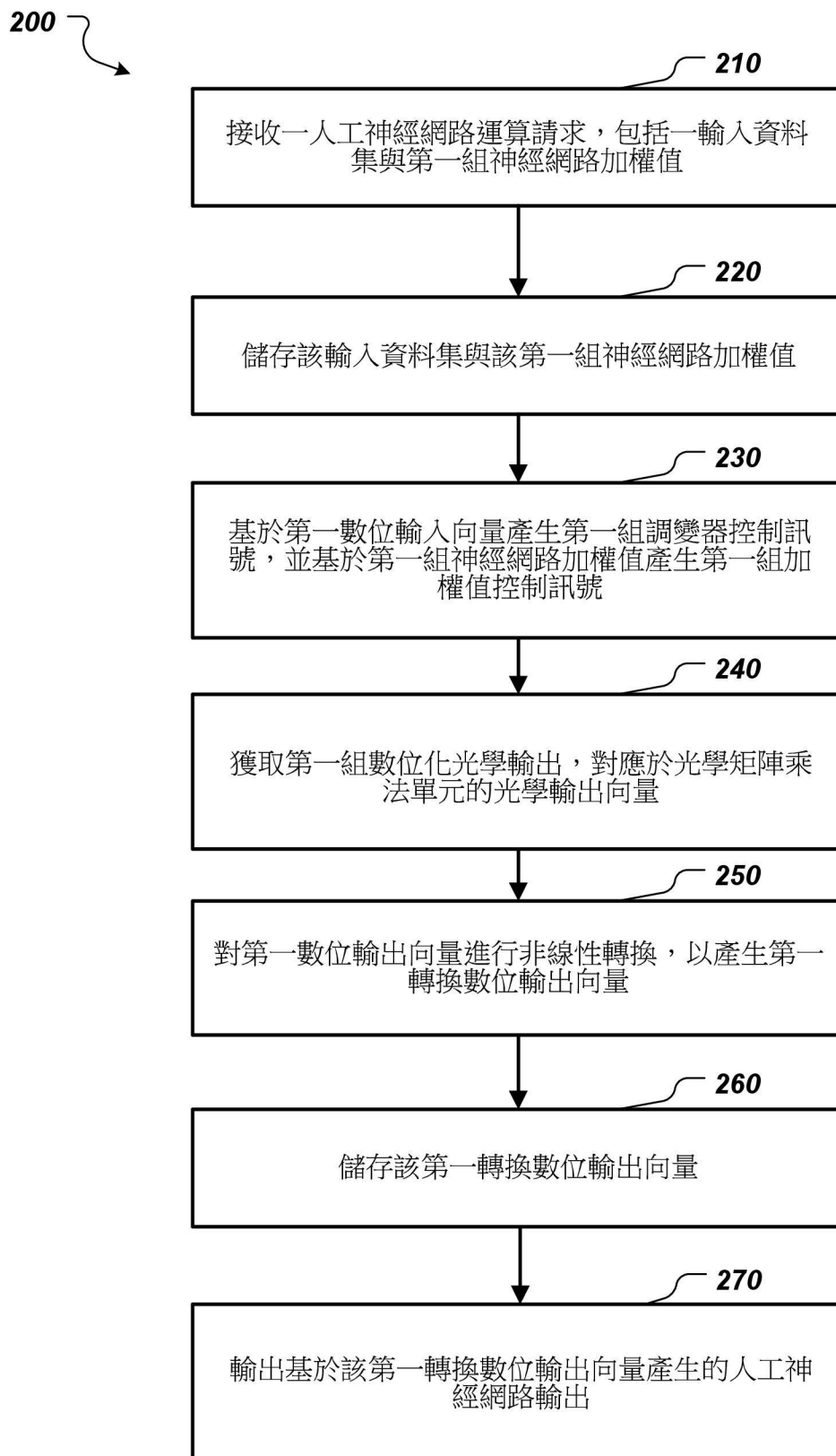


第 2 圖

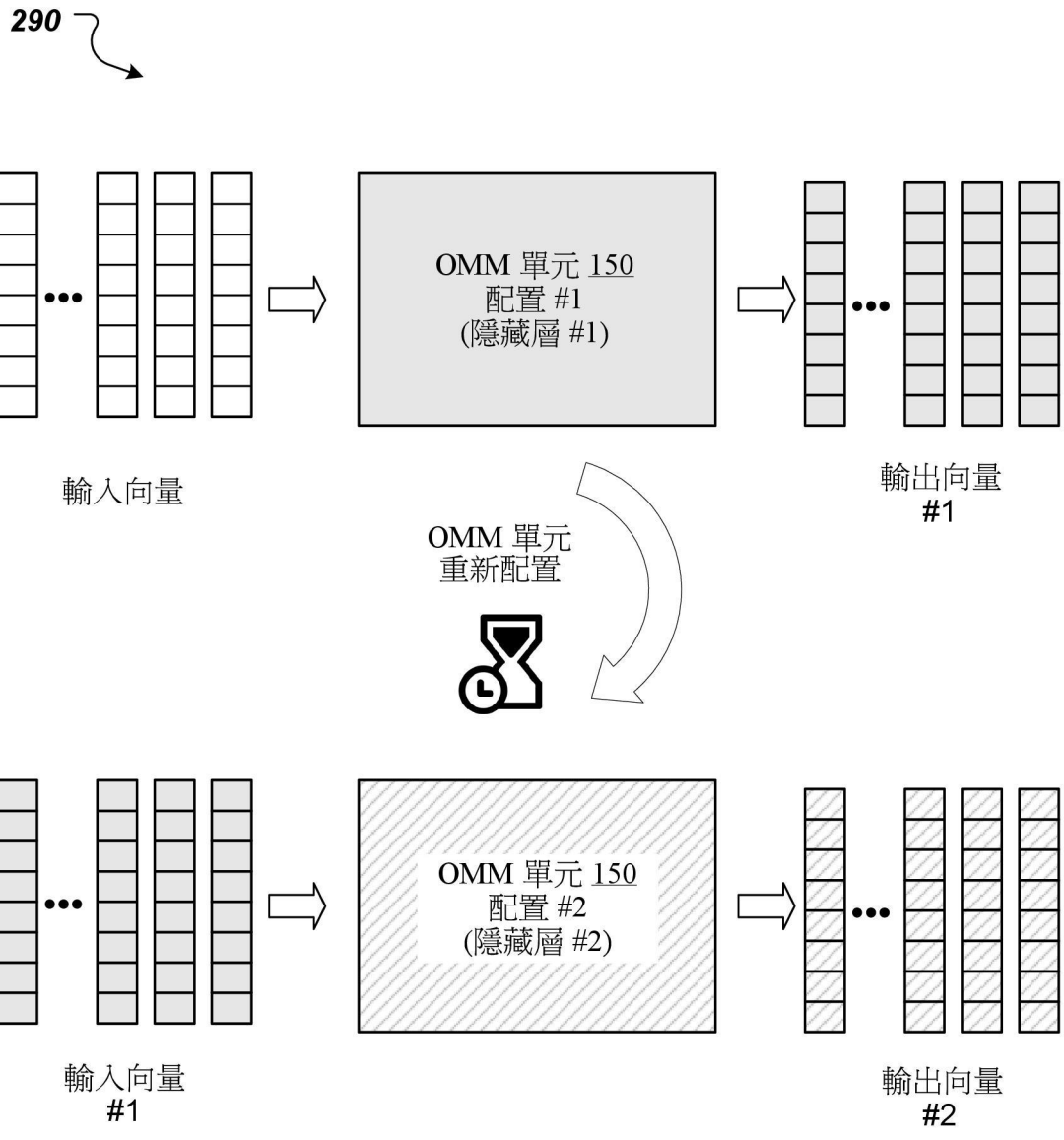




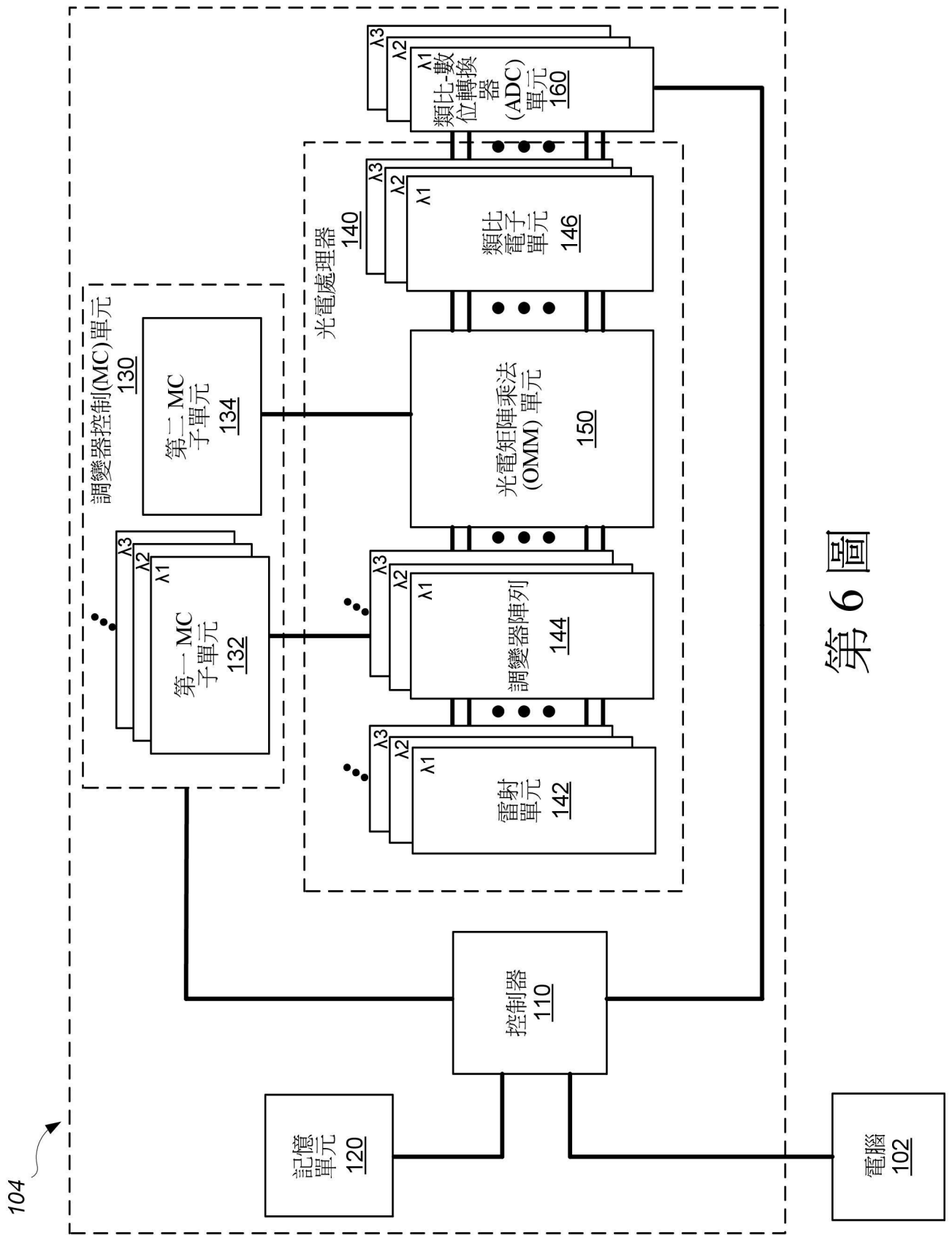
第 3 圖



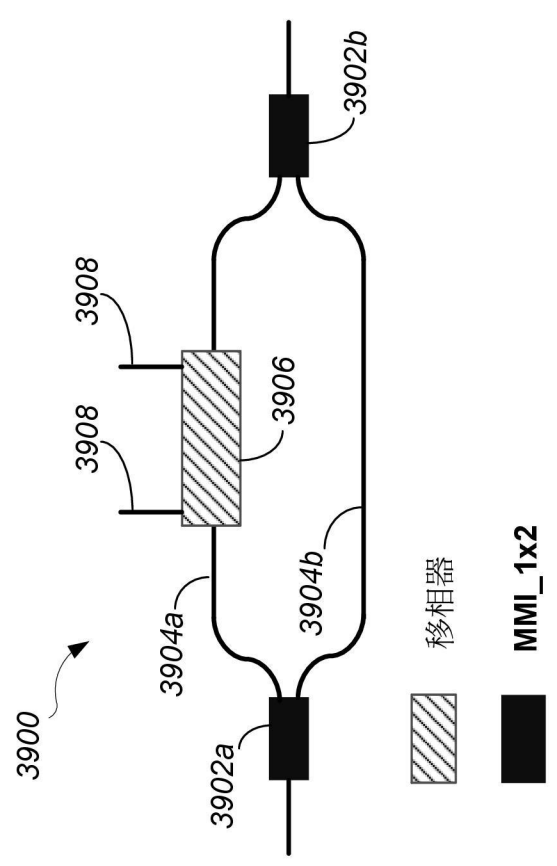
第 4 圖



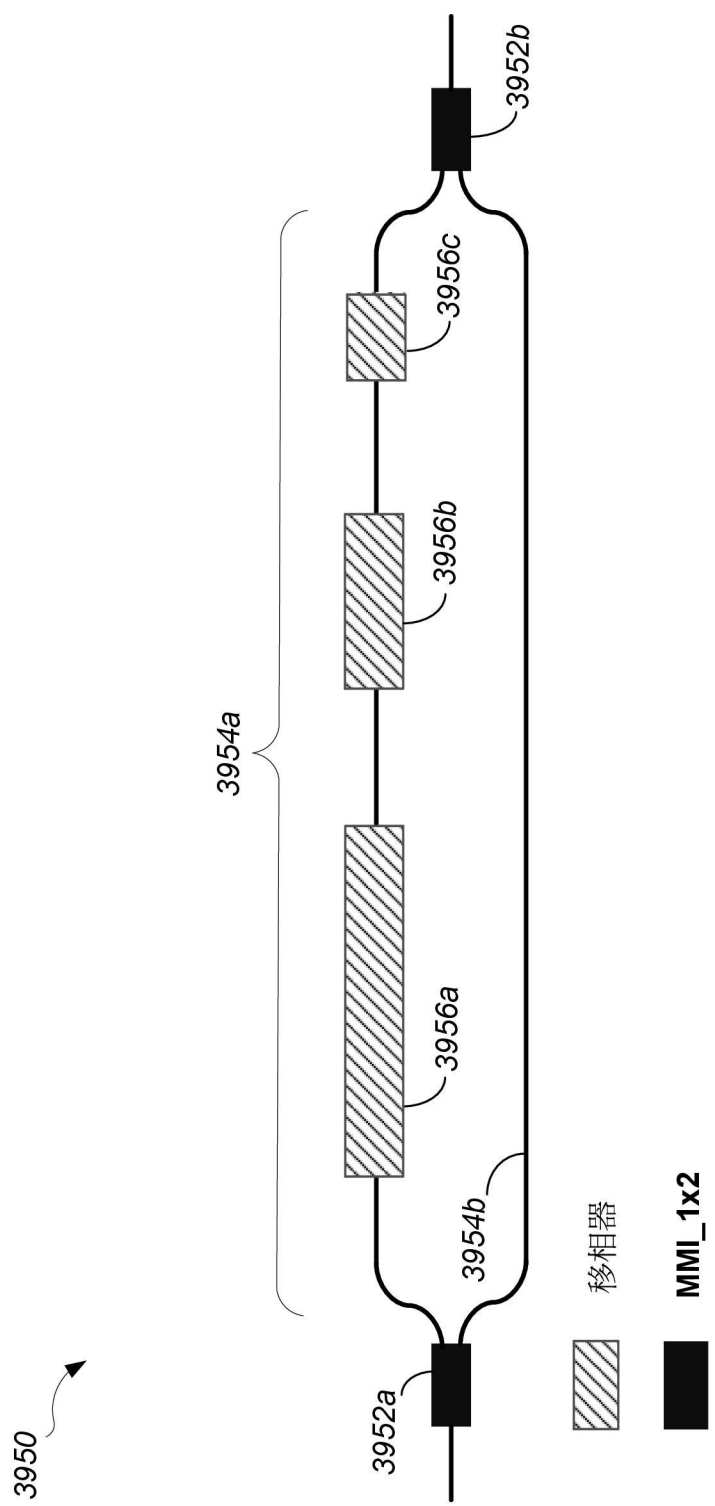
第 5 圖



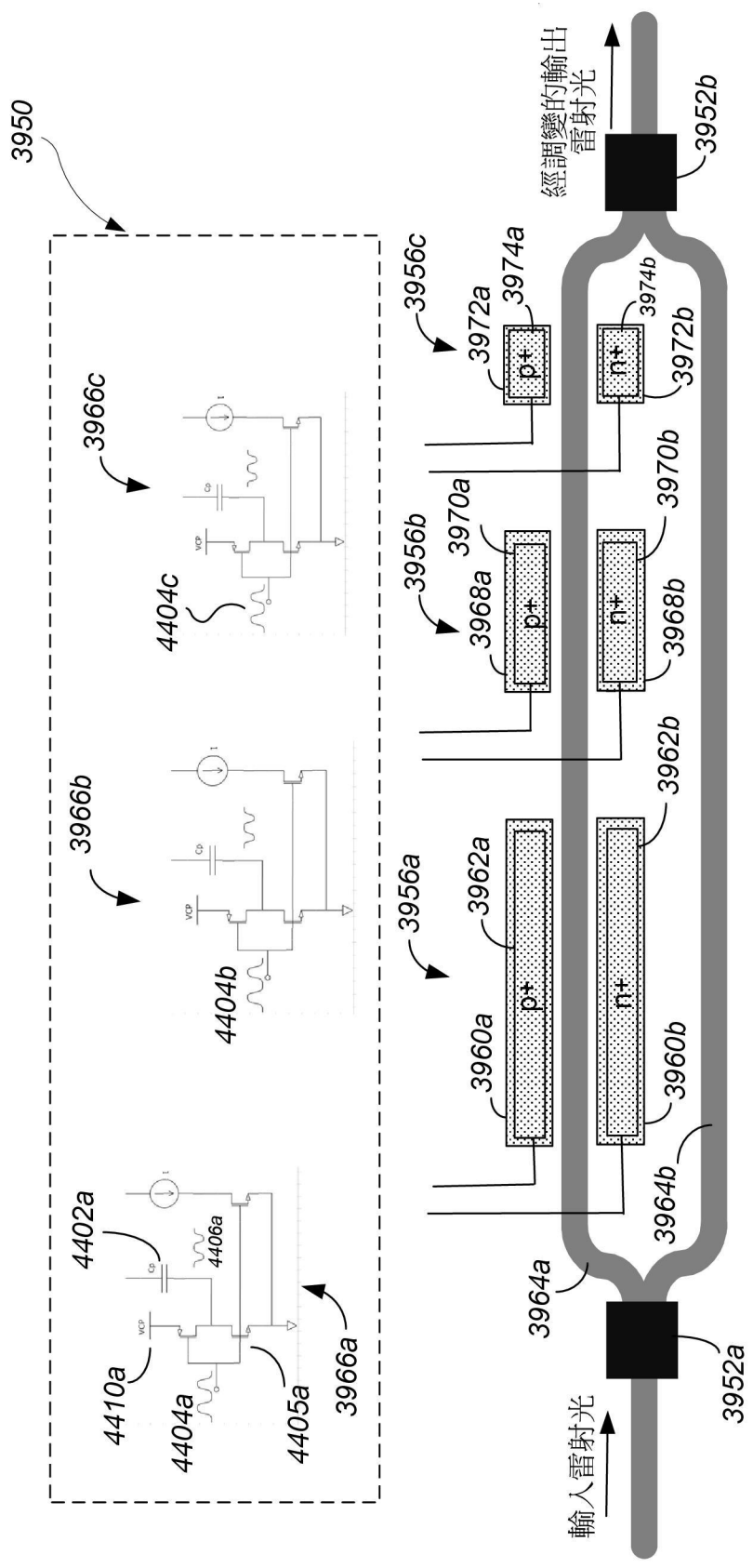
第 6 圖



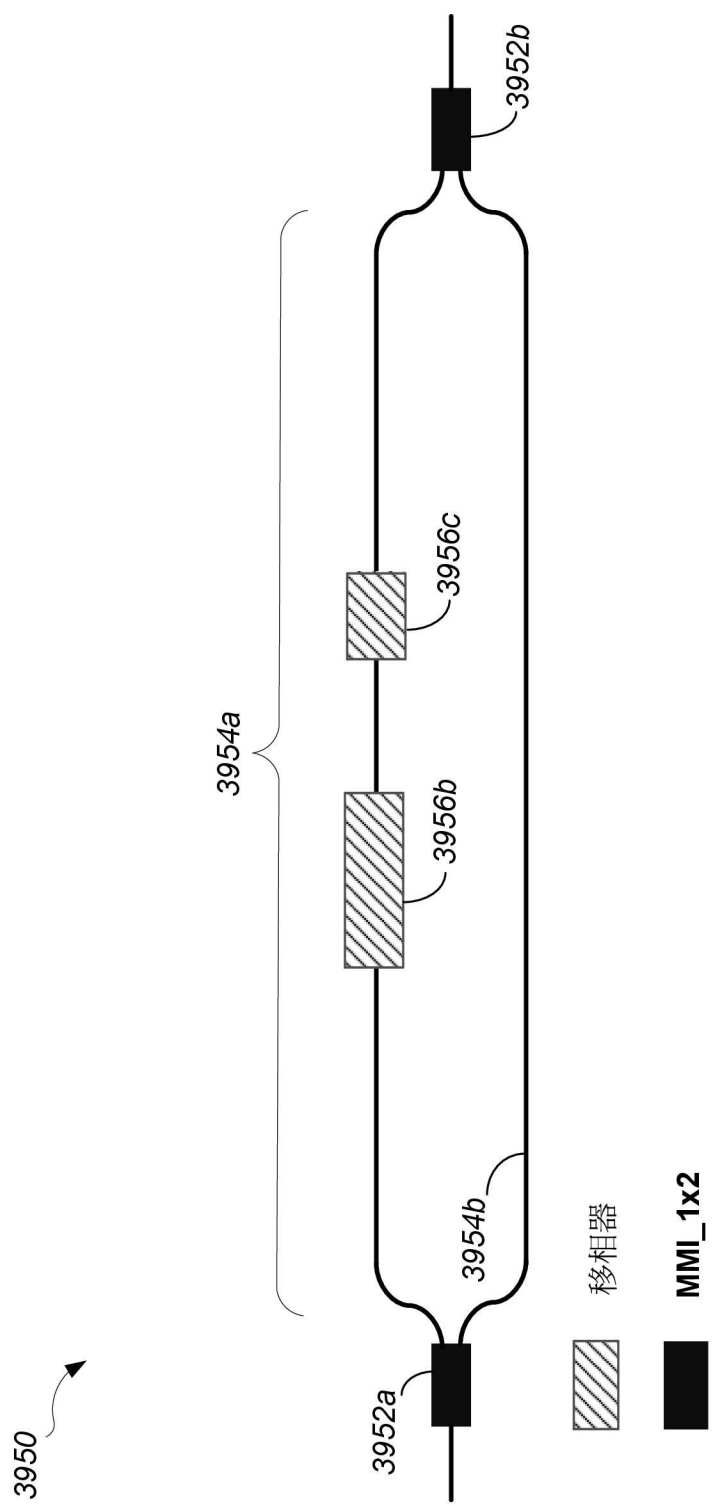
第7圖



第 8 圖

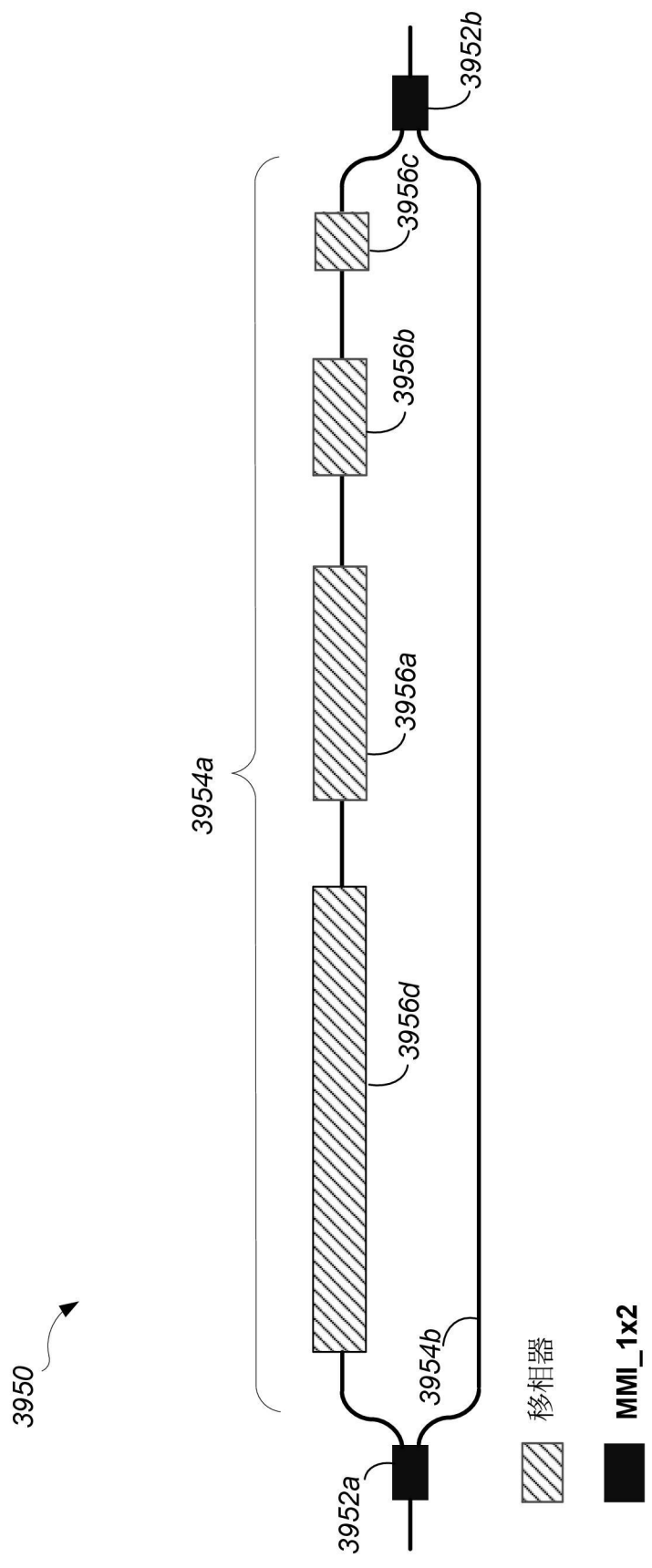


第9圖

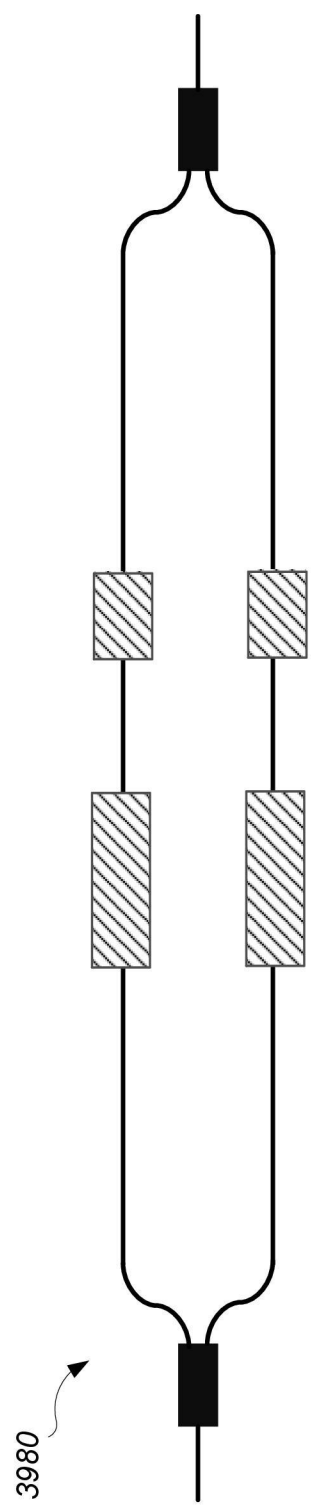


第 10 圖

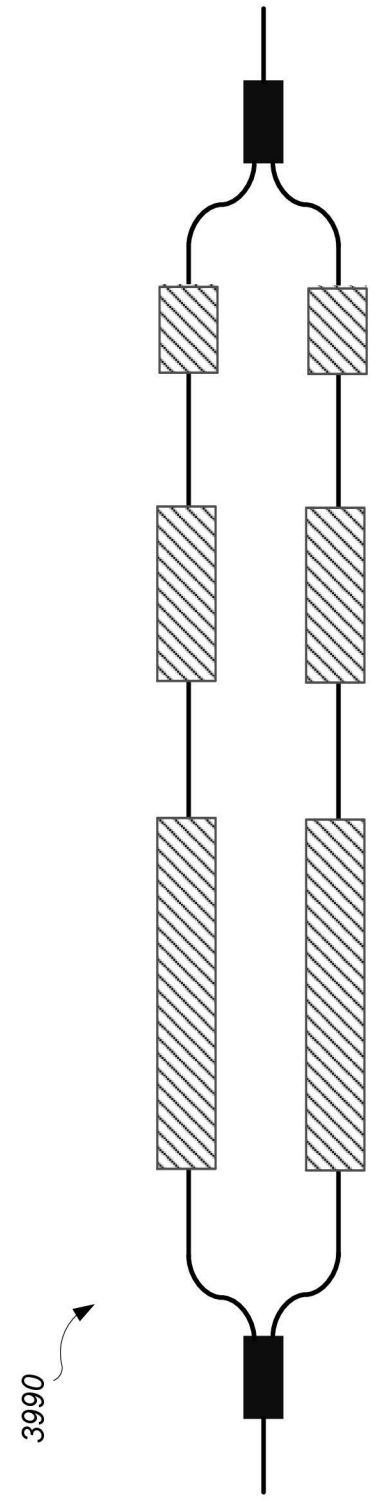




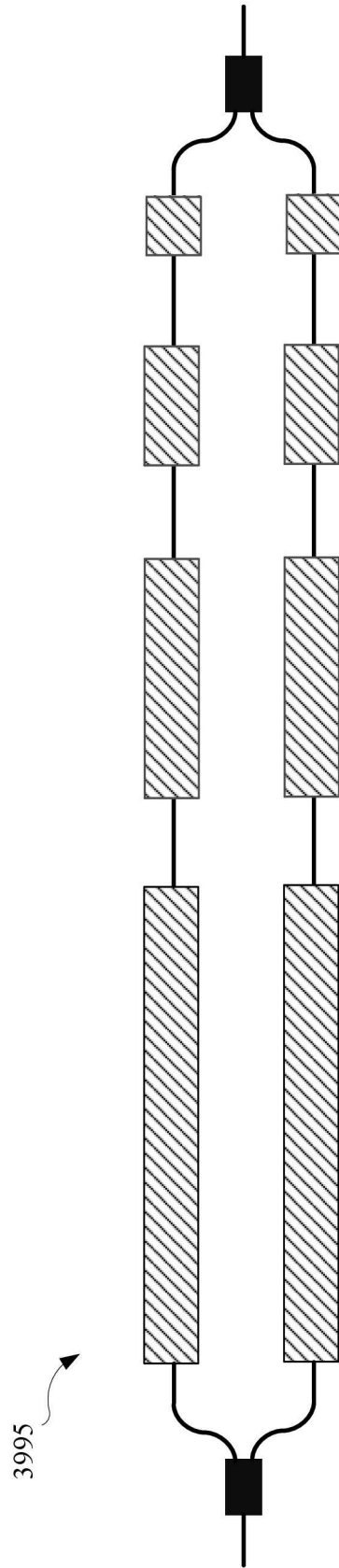
第 11 圖



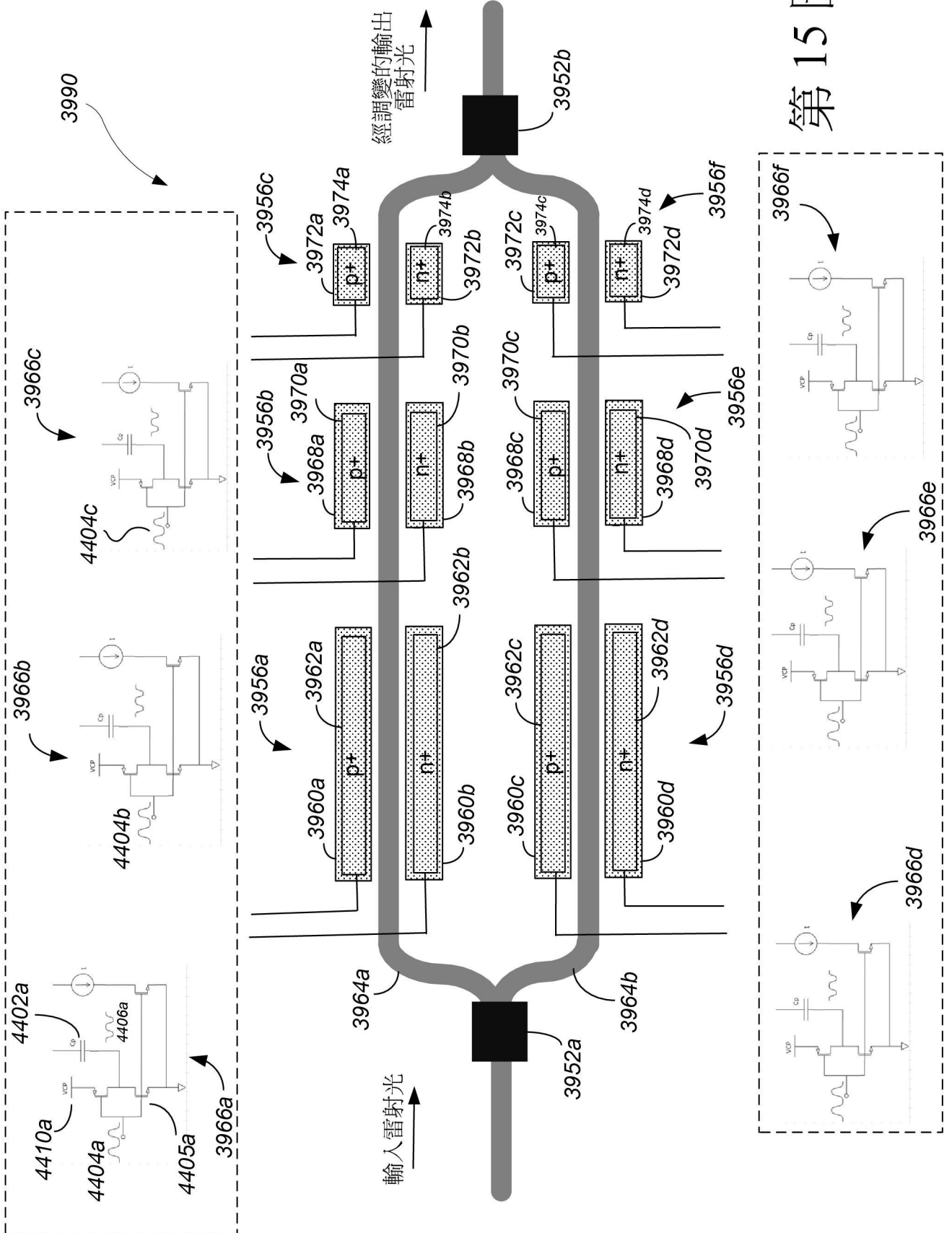
第12圖



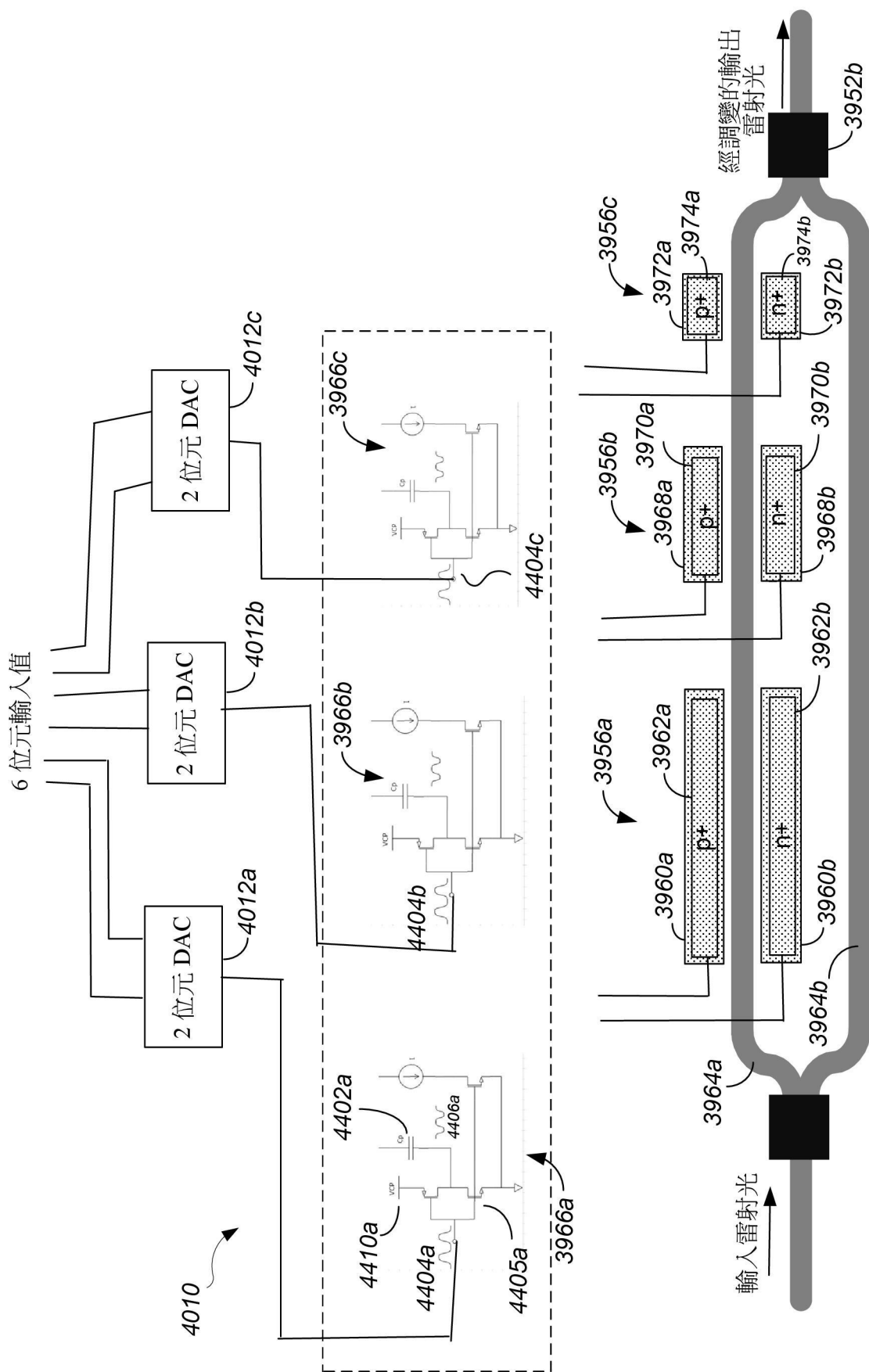
第13圖



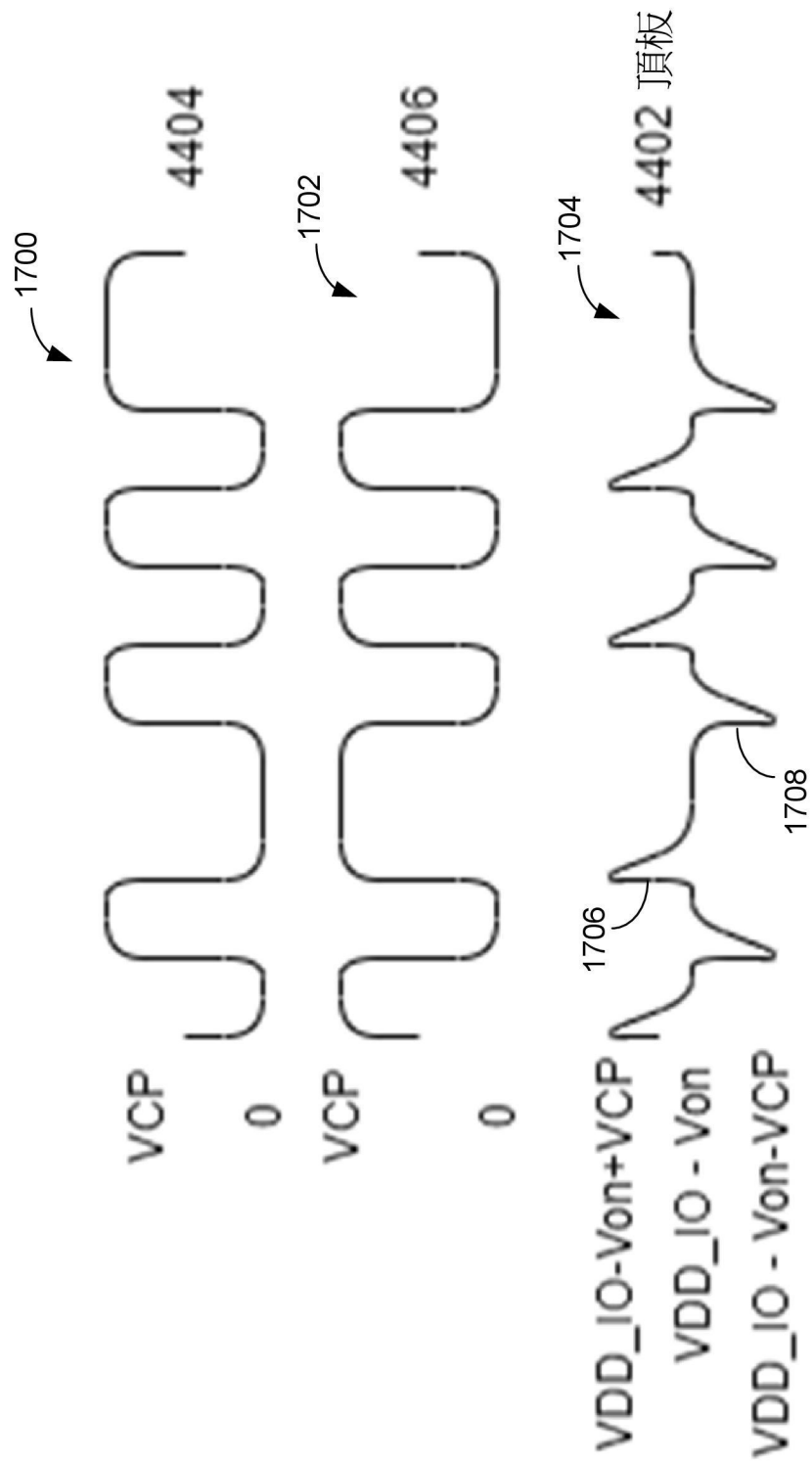
第 14 圖



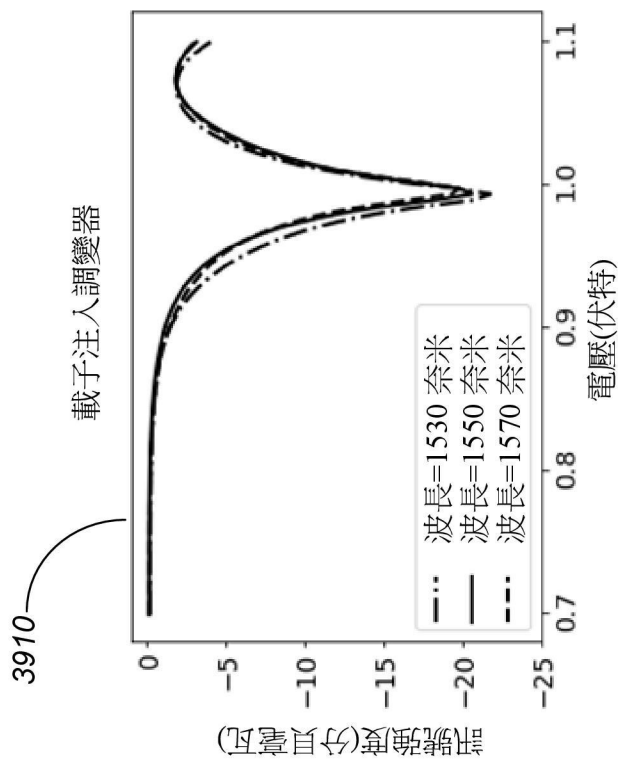
第15圖



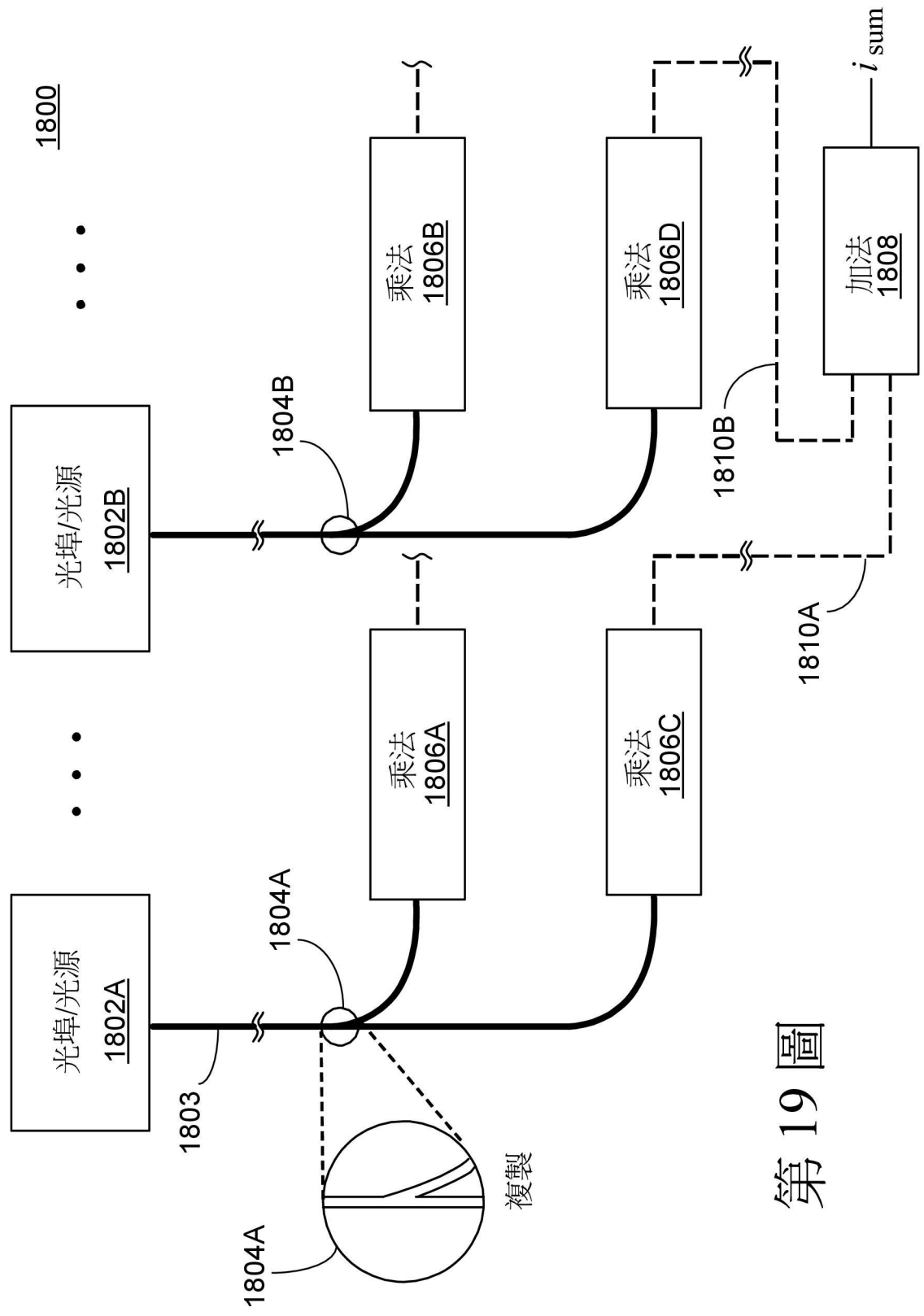
第 16 圖



第 17 圖

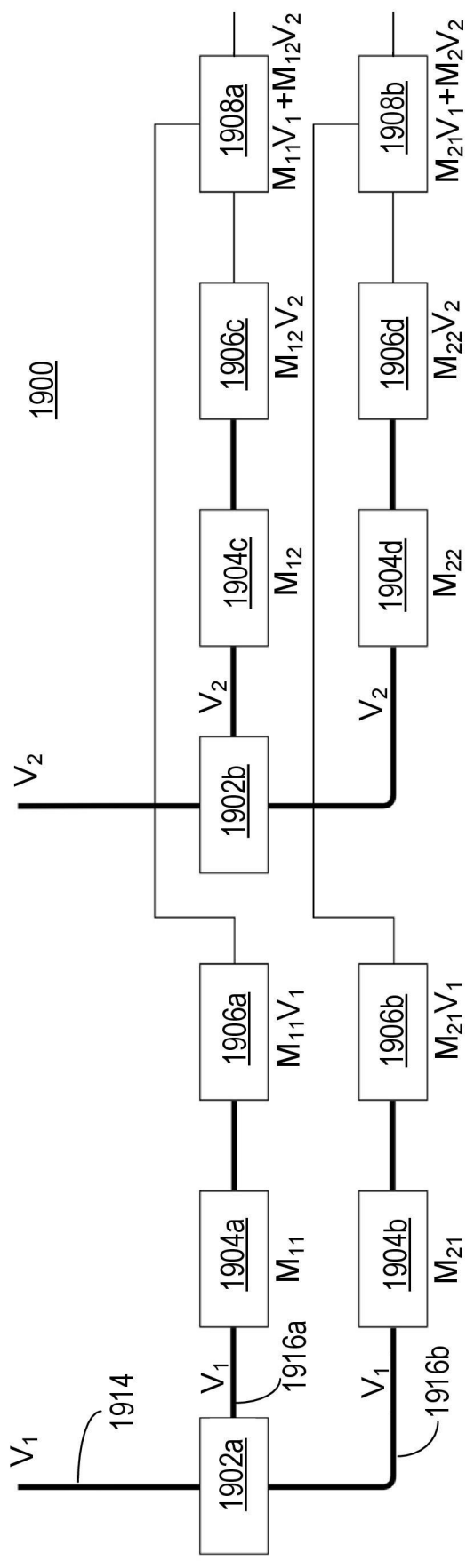


第 18 圖

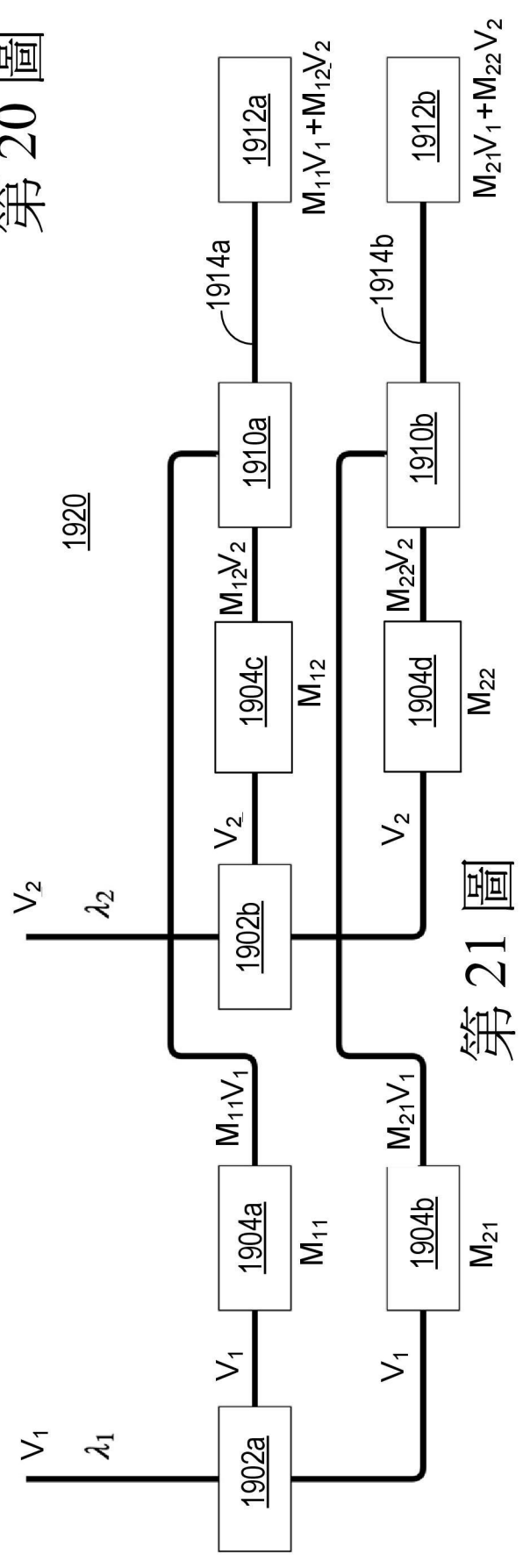


第 19 圖

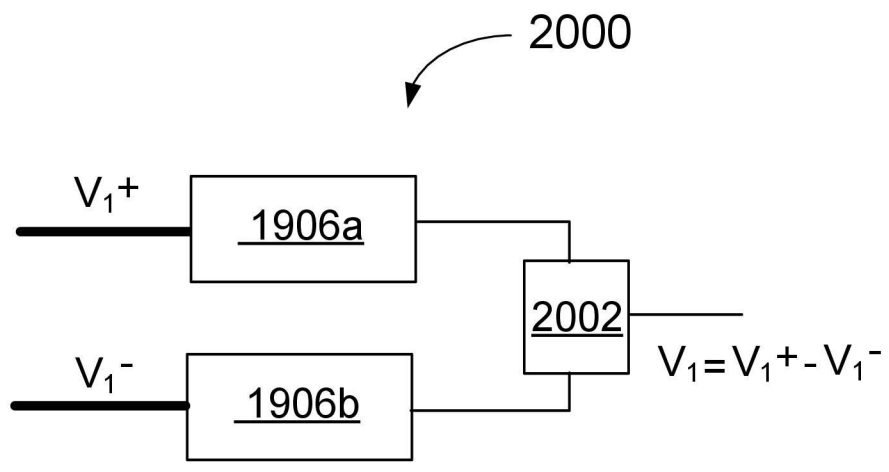




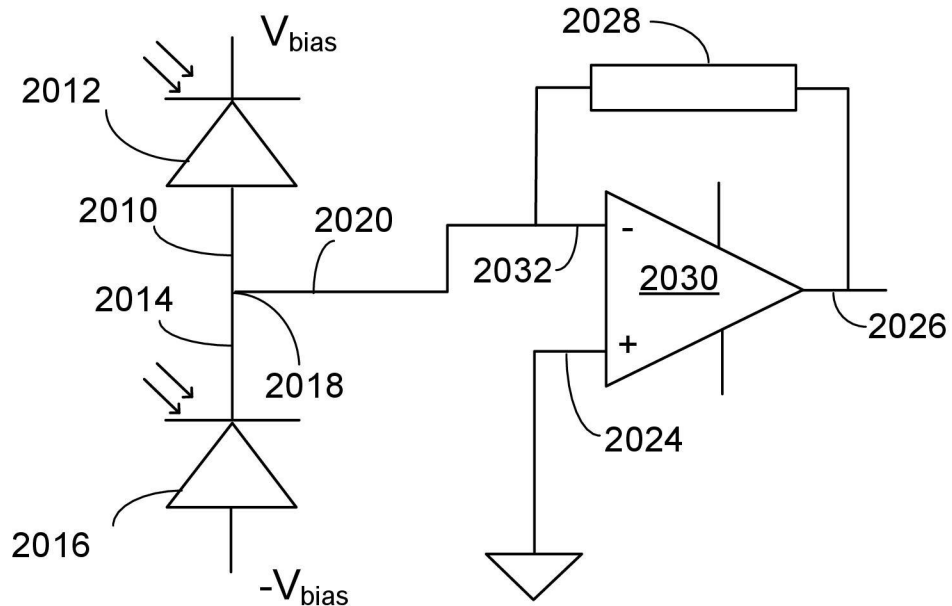
第 20 圖



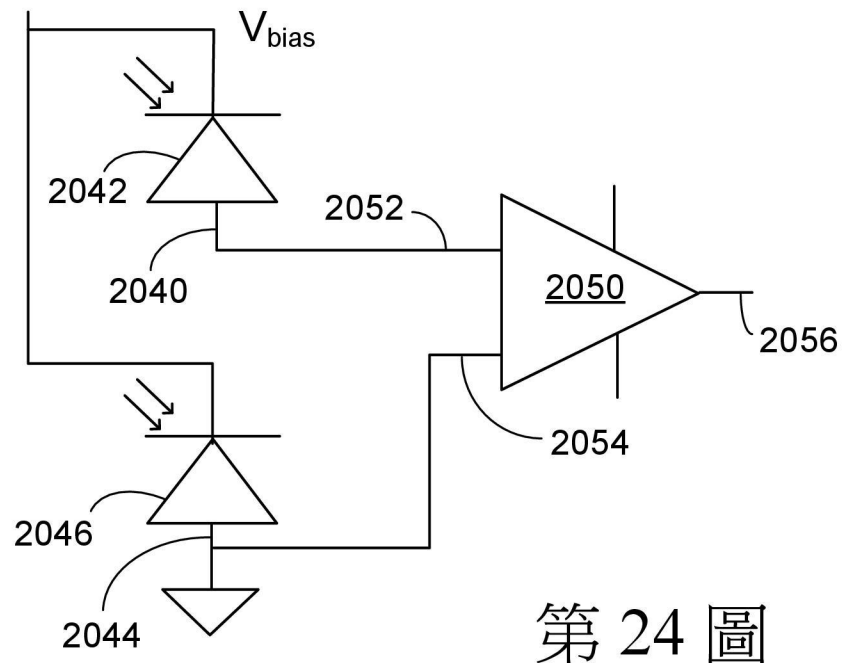
第 21 圖



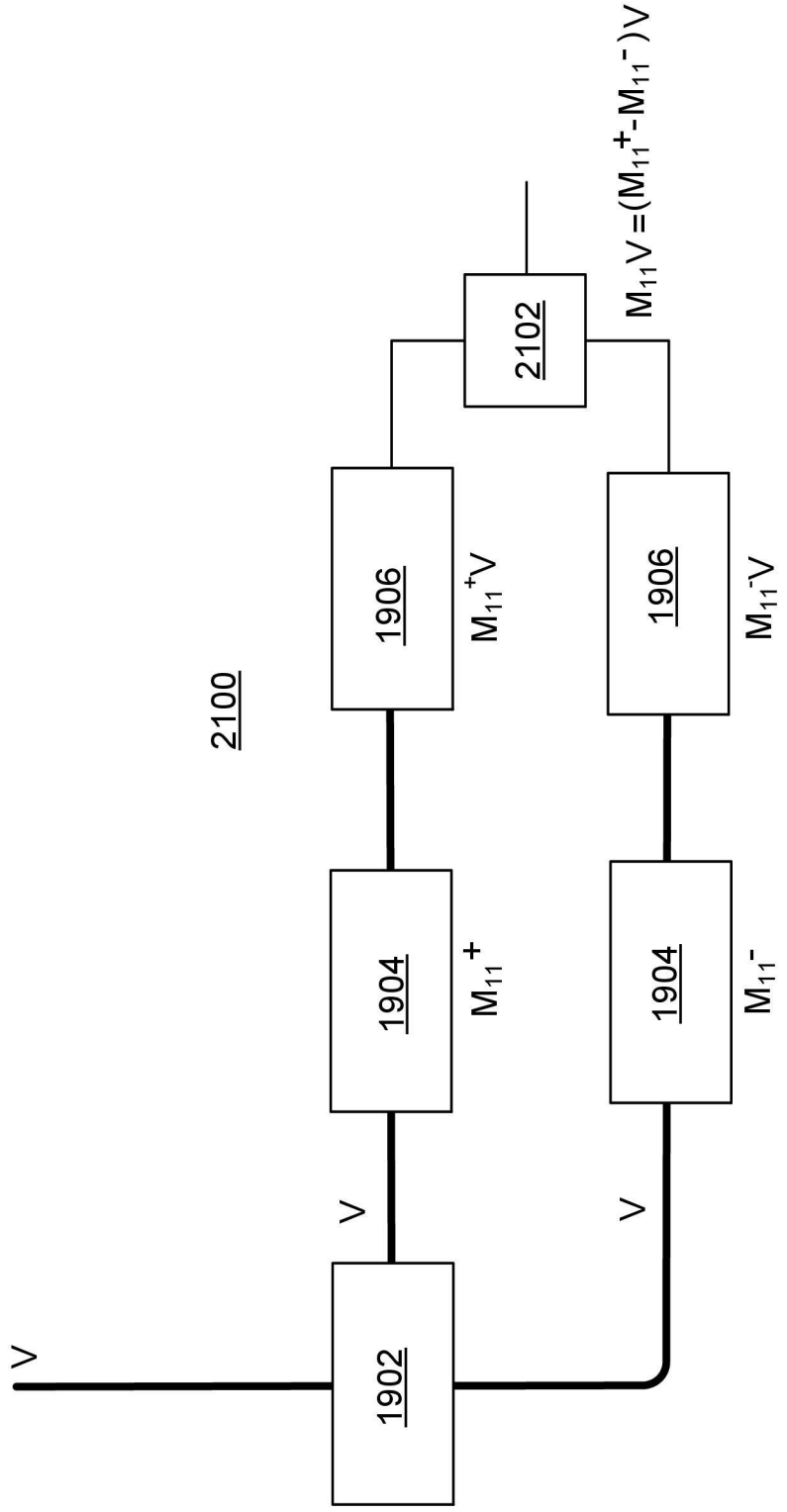
第 22 圖



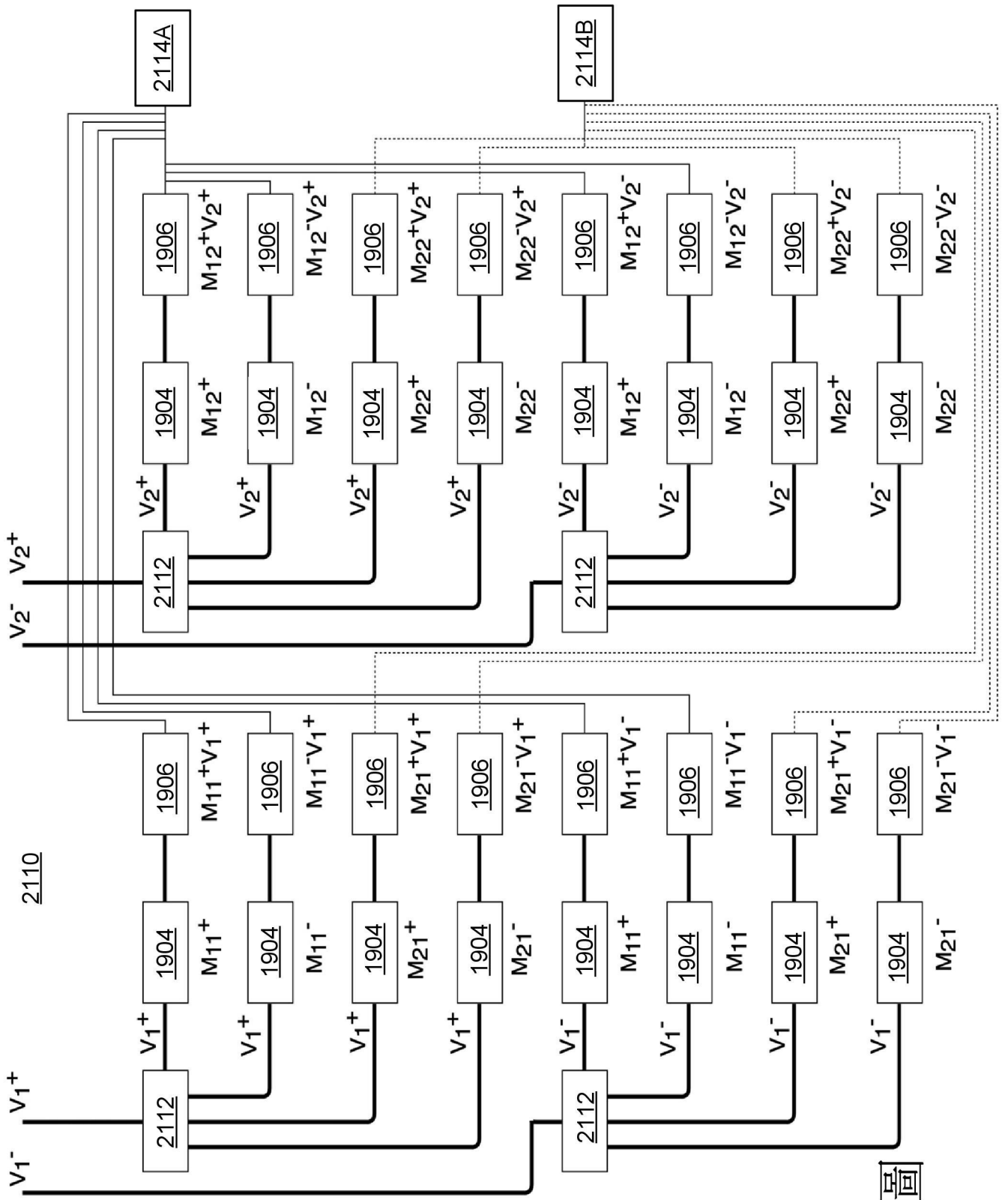
第 23 圖



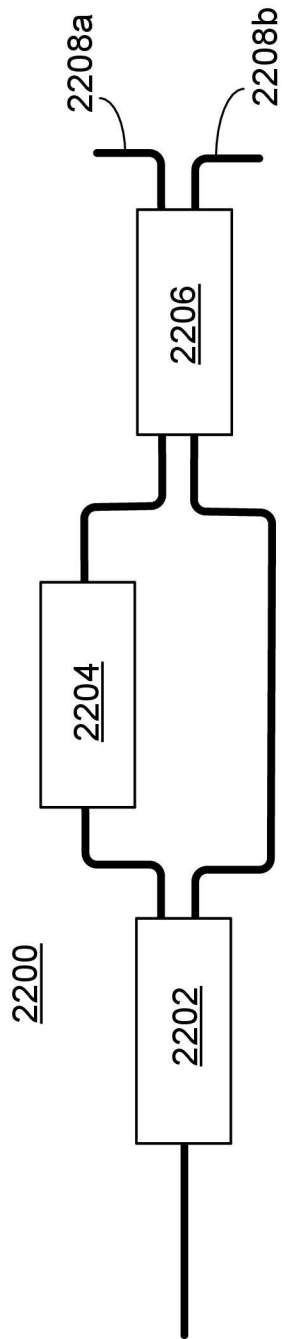
第 24 圖



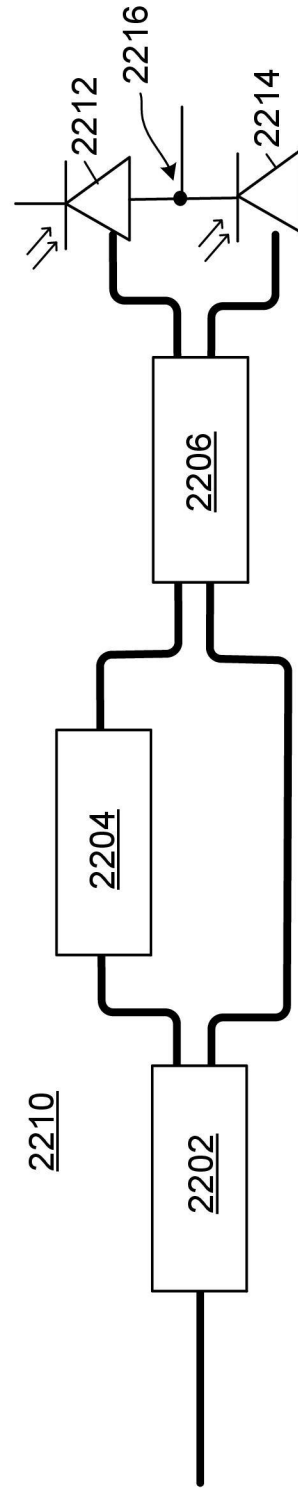
第 25 圖



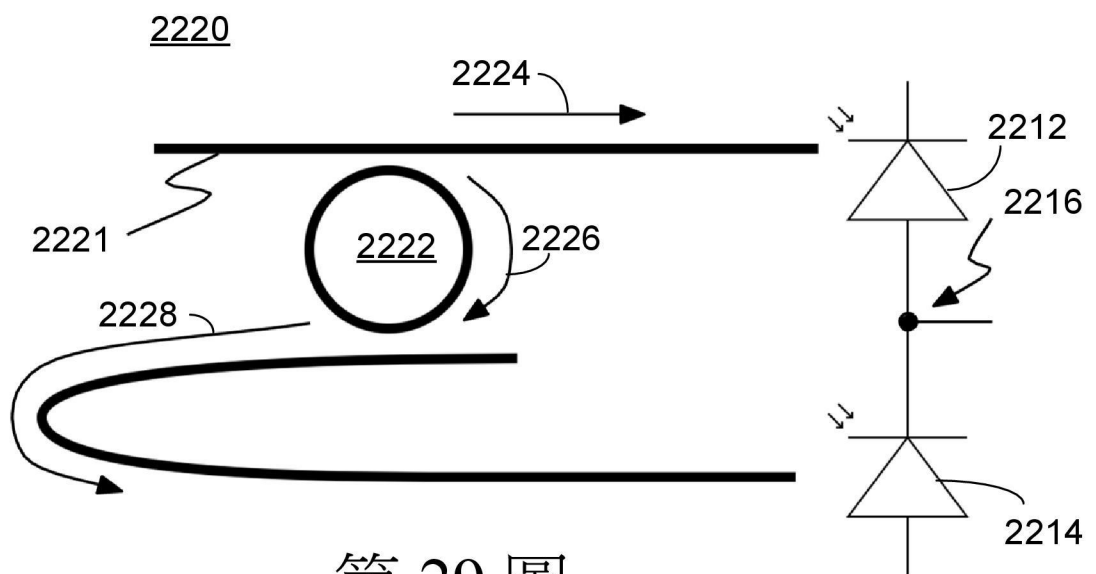
第 26 圖



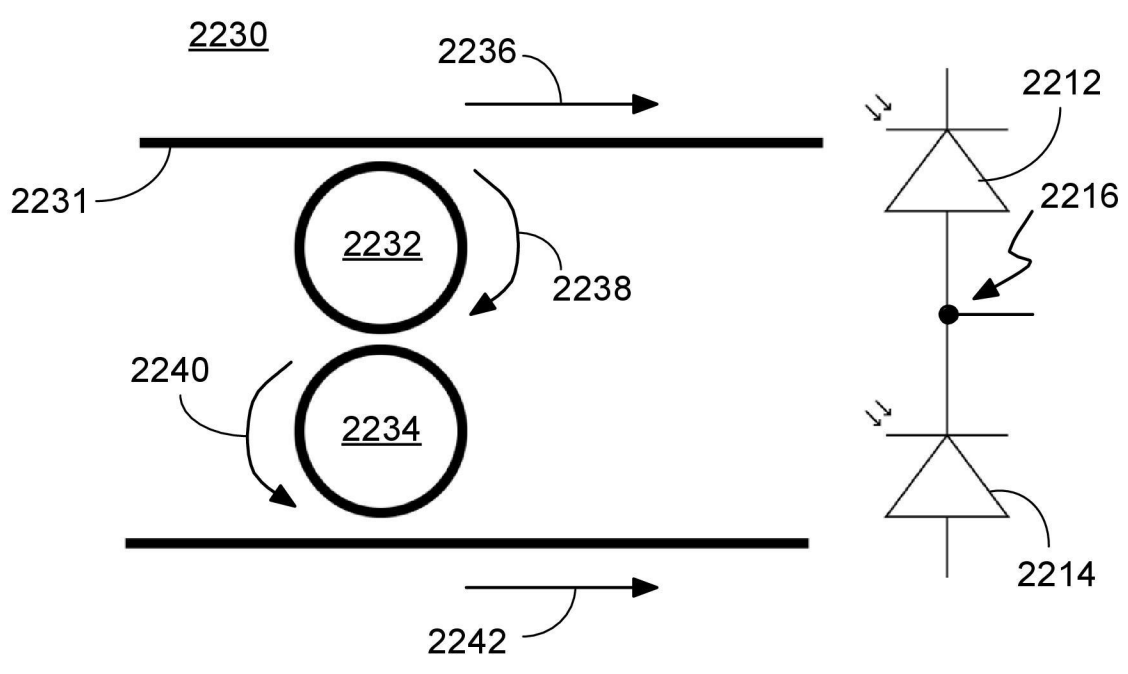
第 27 圖



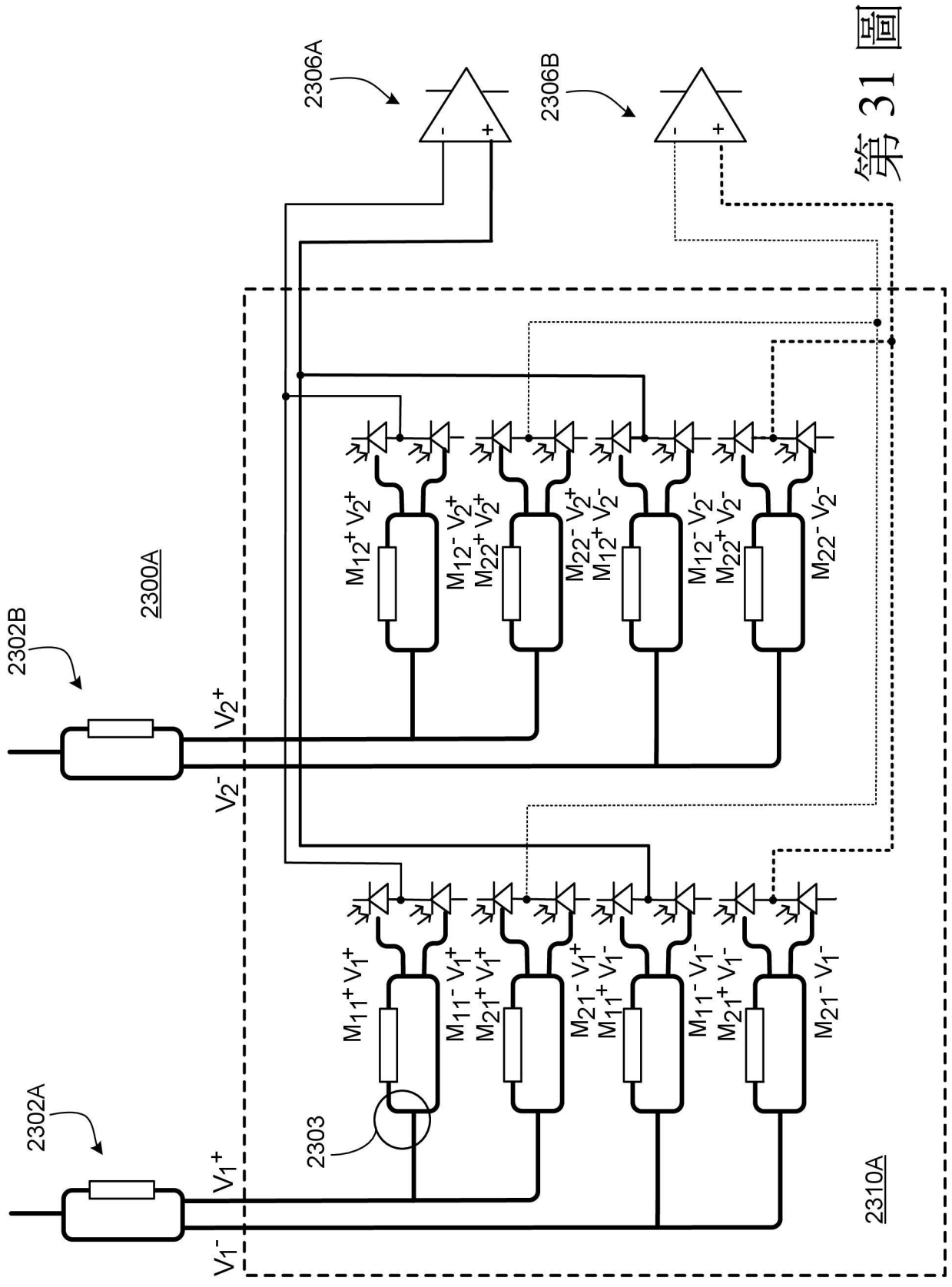
第 28 圖



第 29 圖

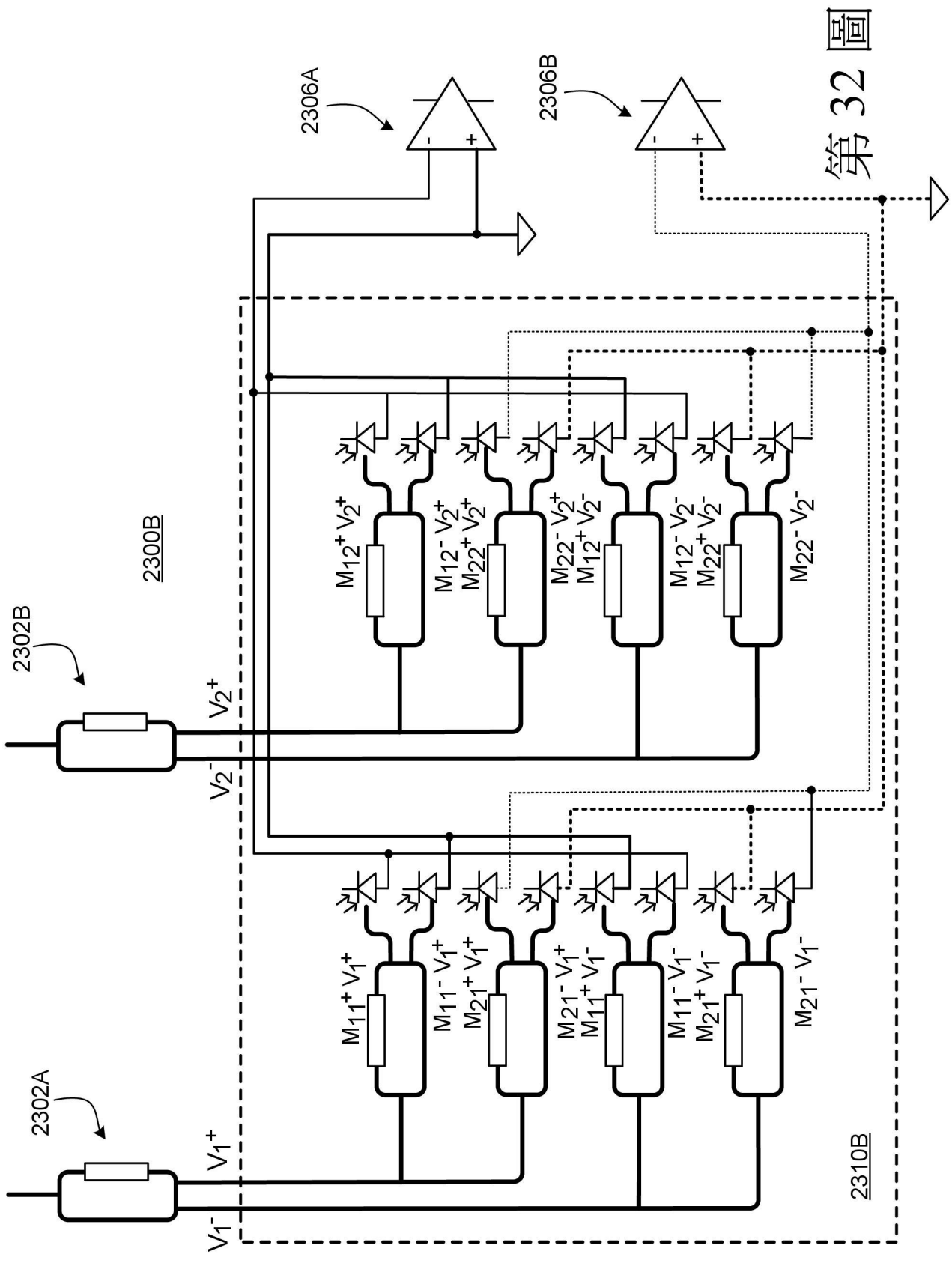


第 30 圖

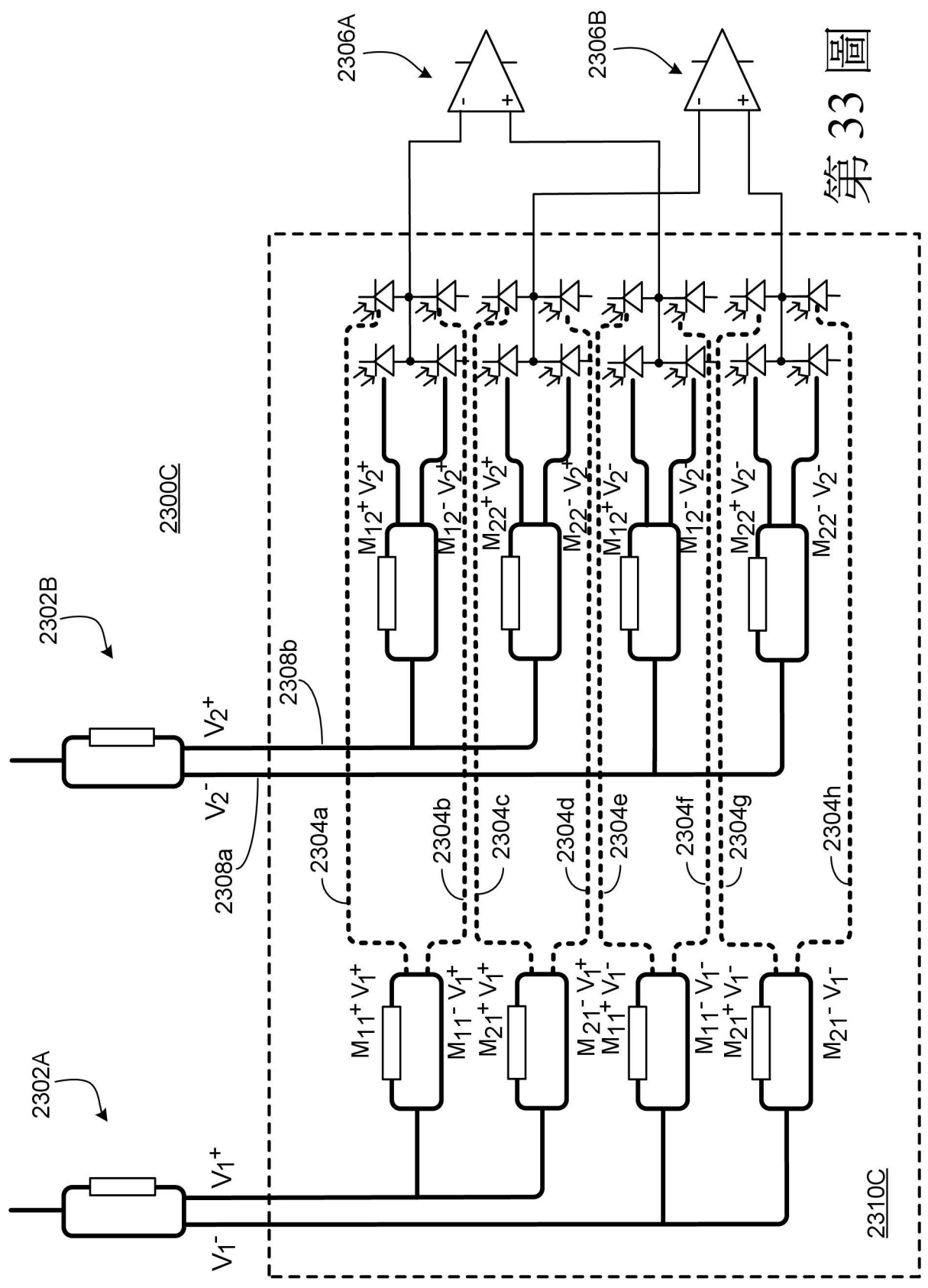


第31圖

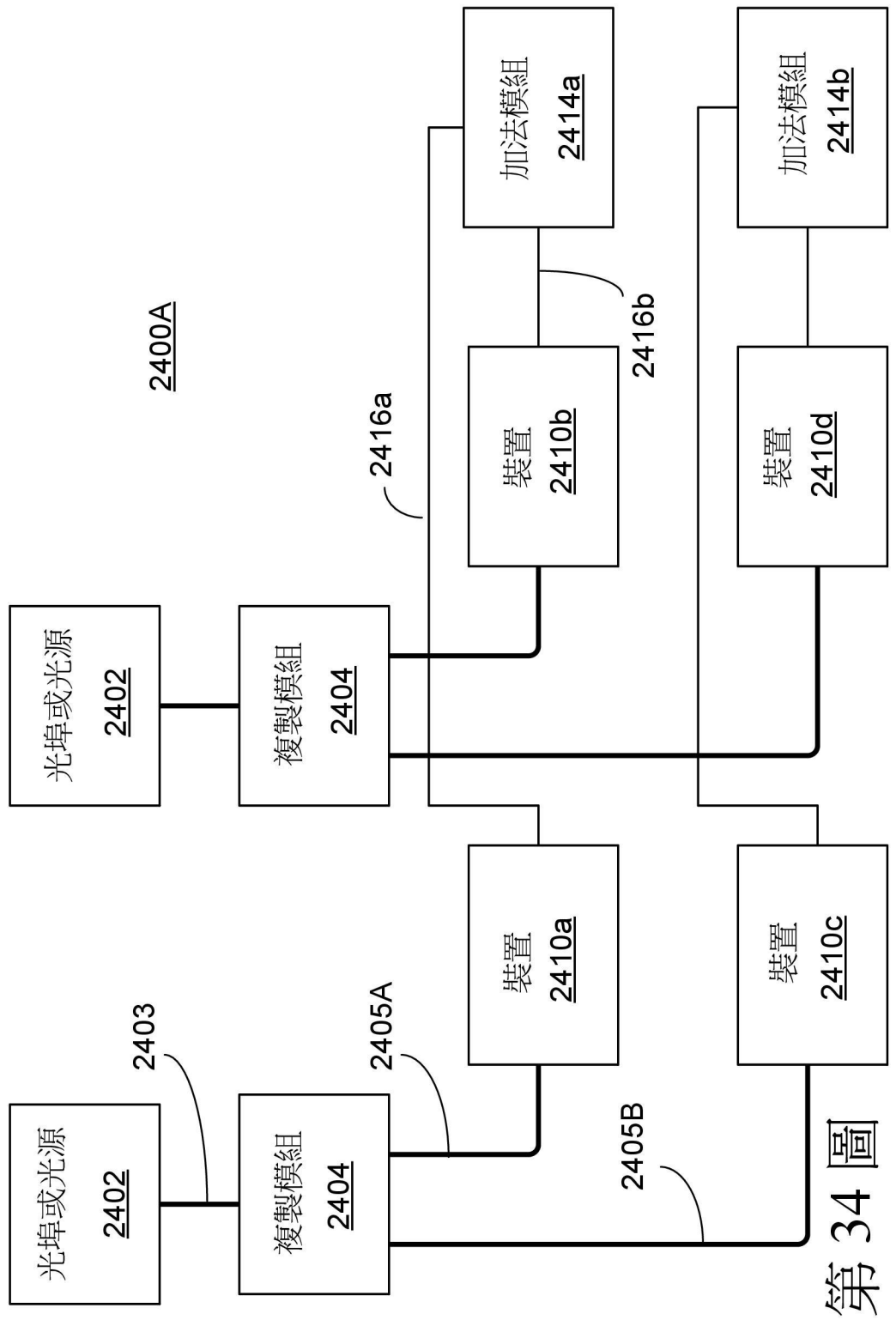




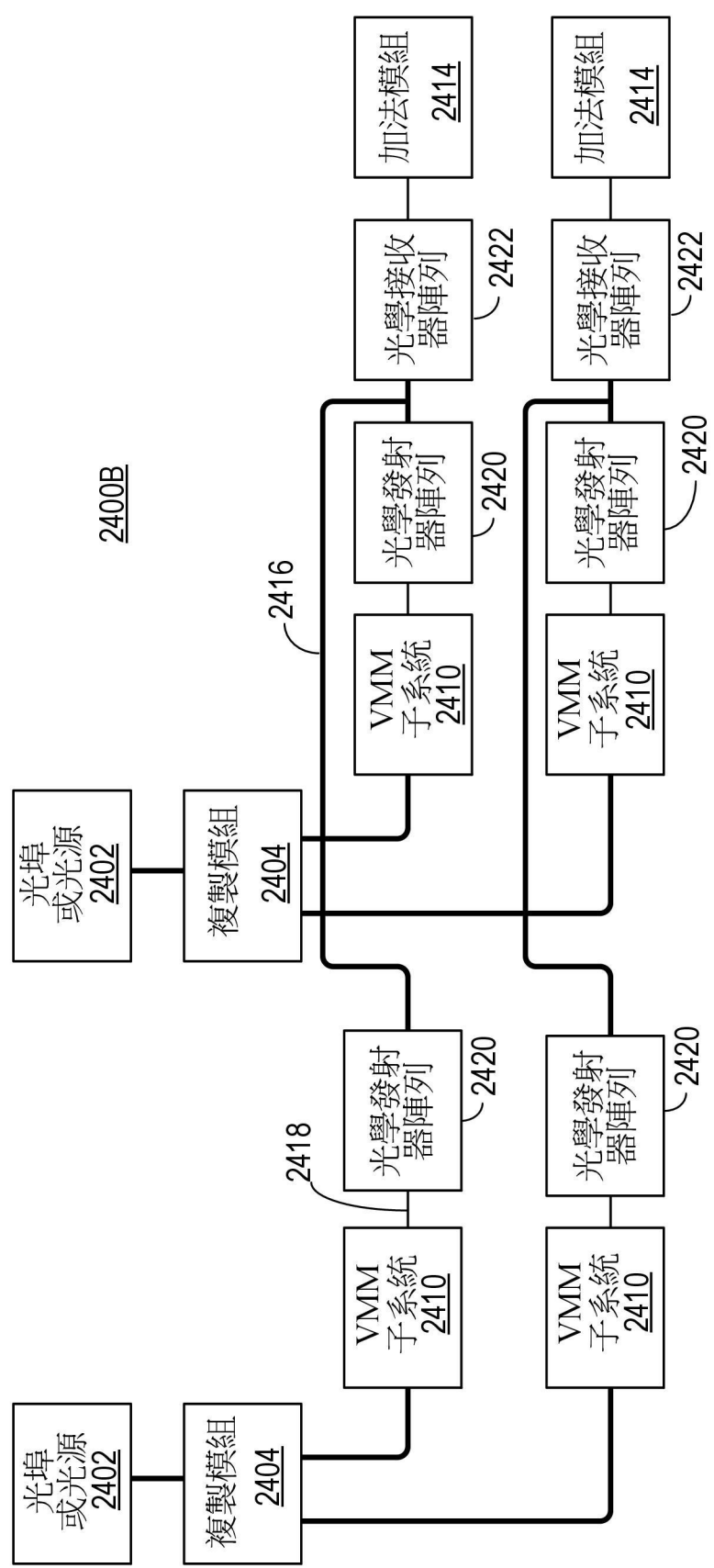
第 32 圖



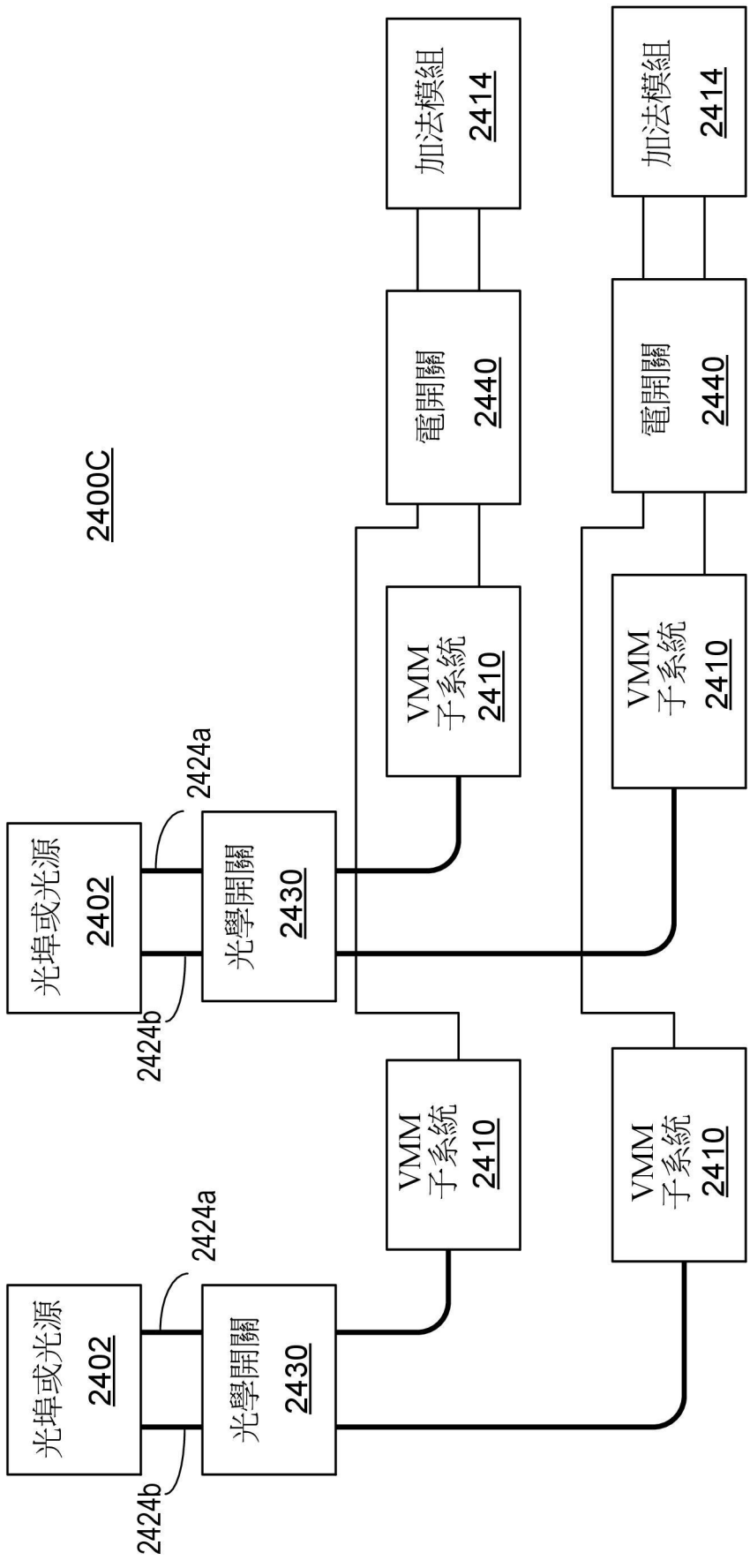
第 33 圖



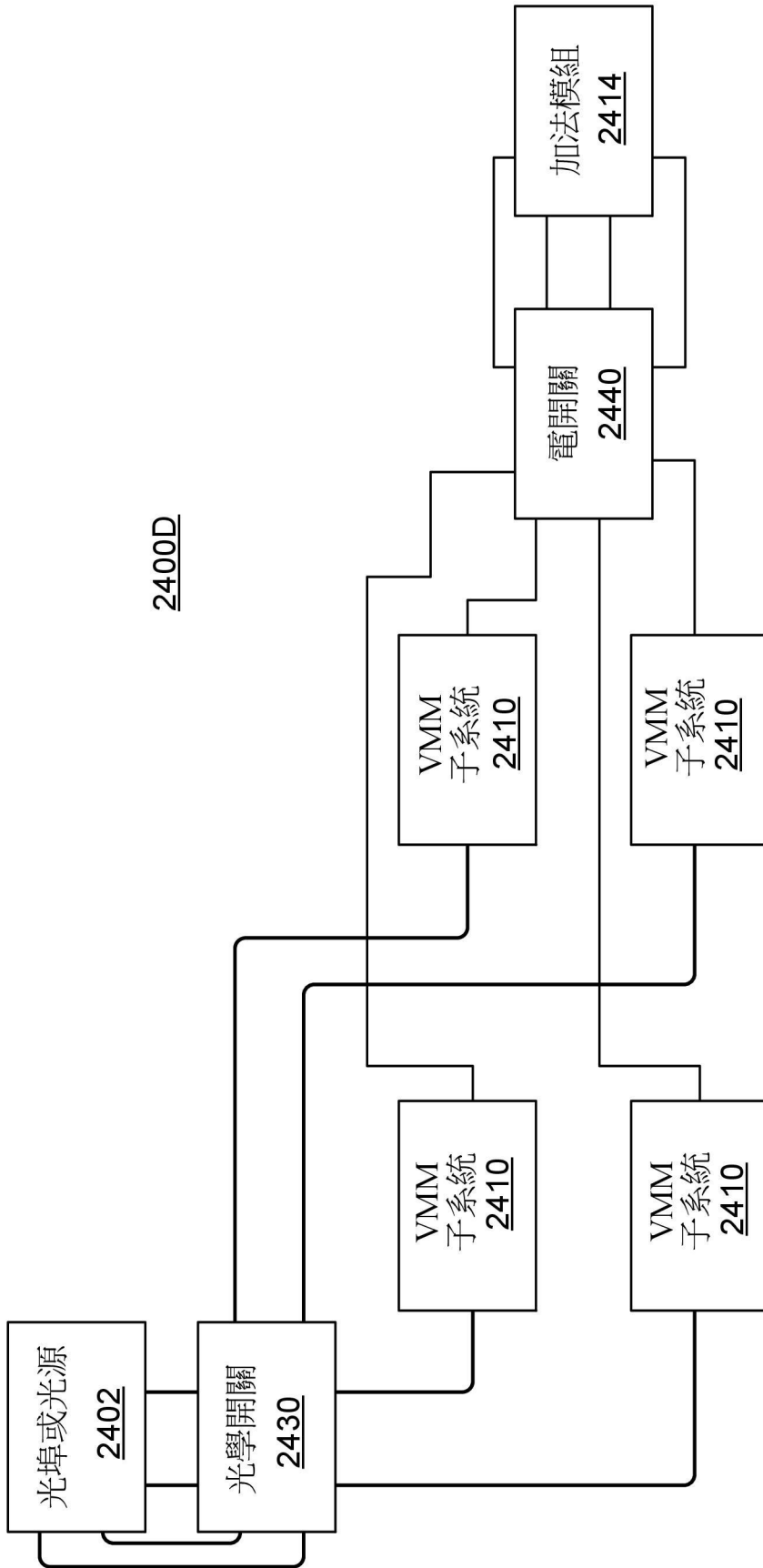
第 34 圖



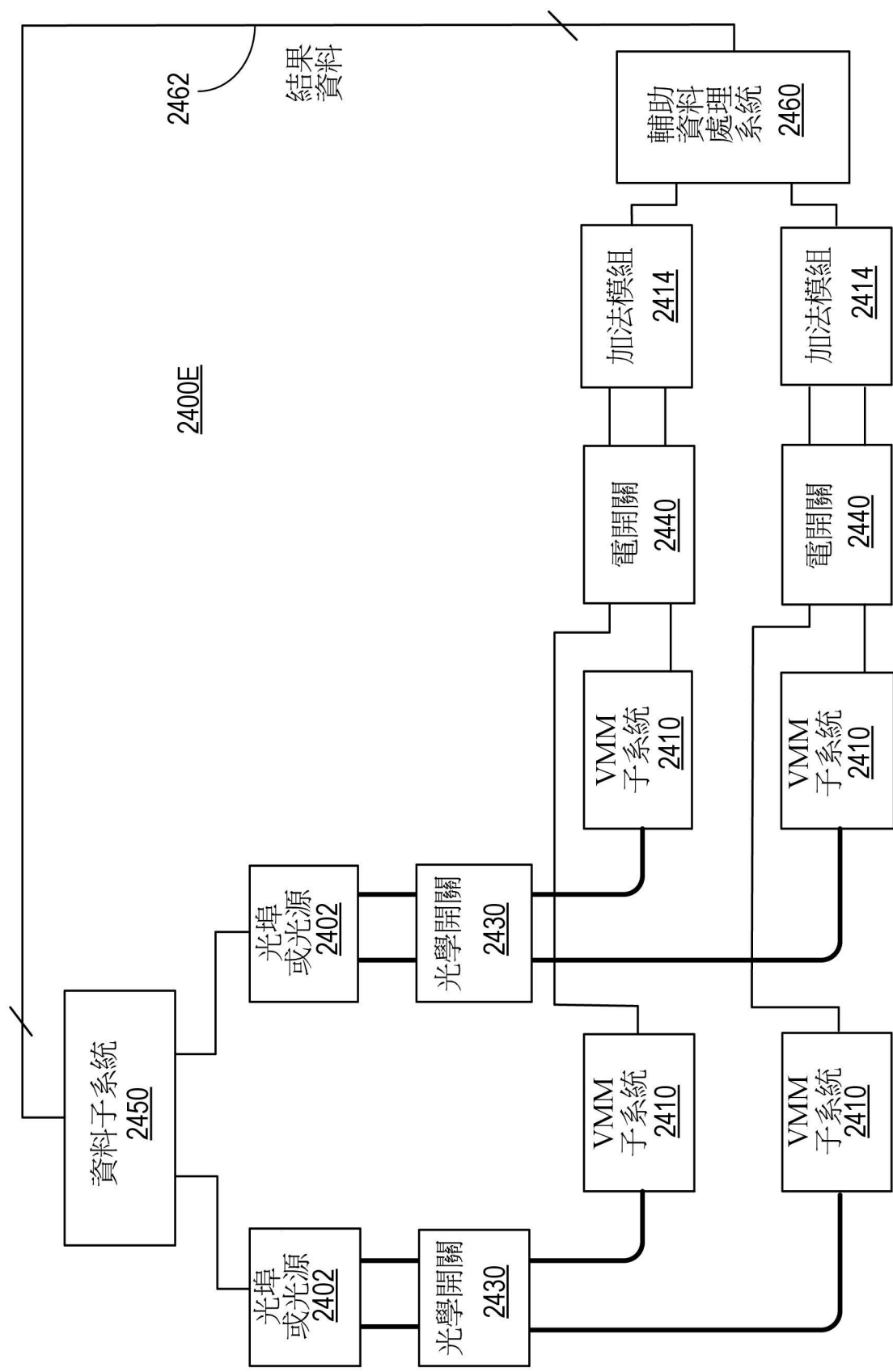
第 35 圖



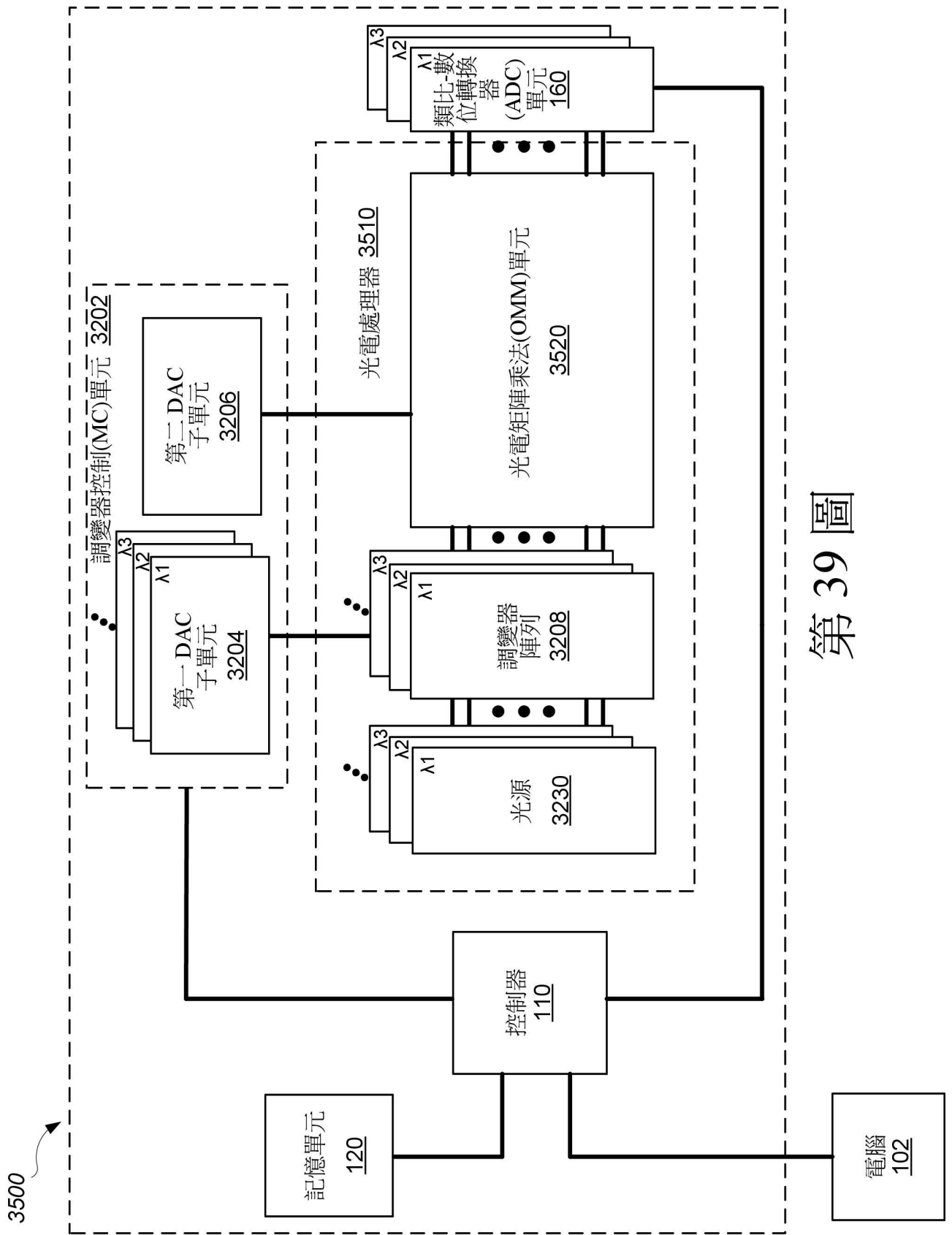
第 36 圖



第 37 圖

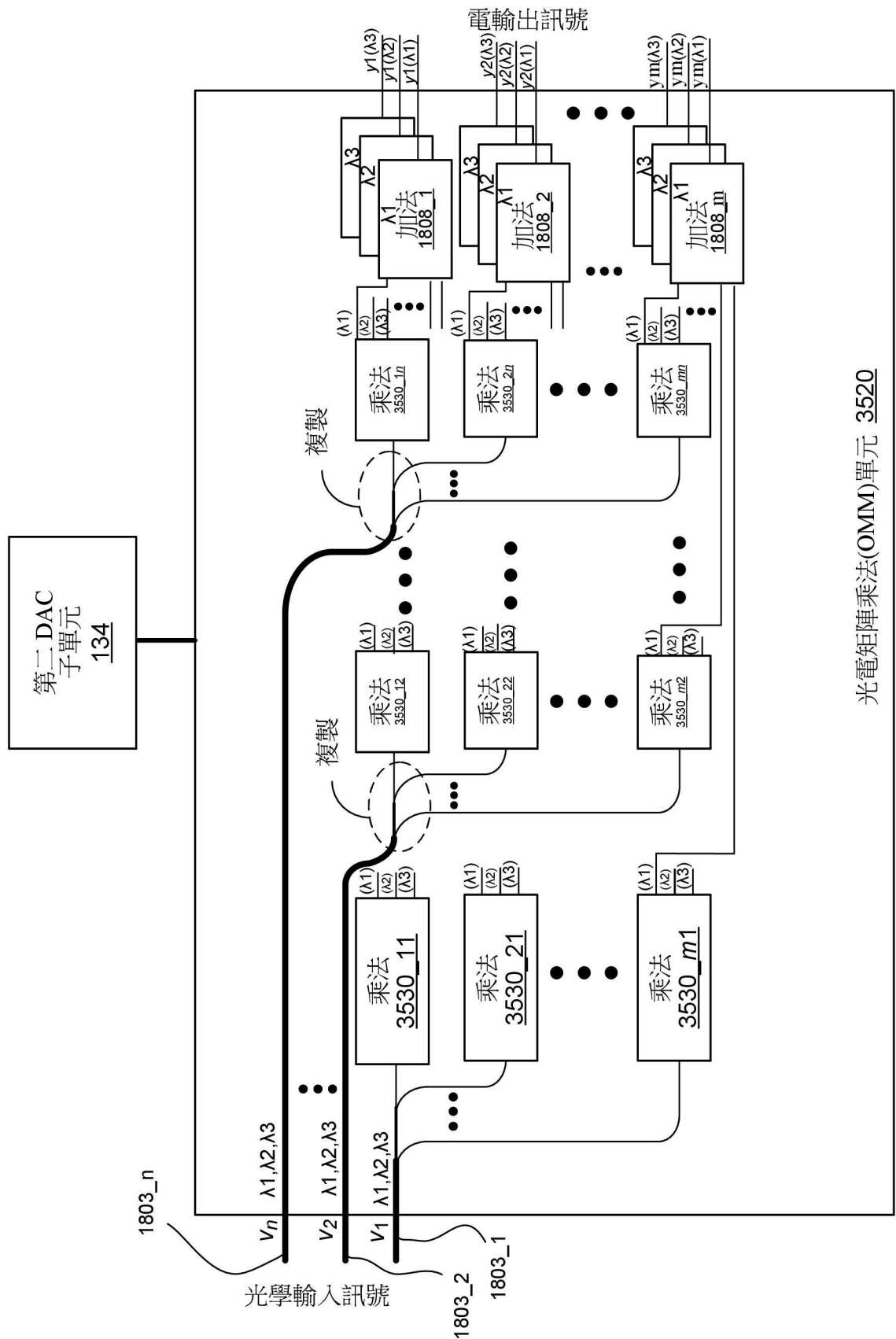


第 38 圖



第 39 圖

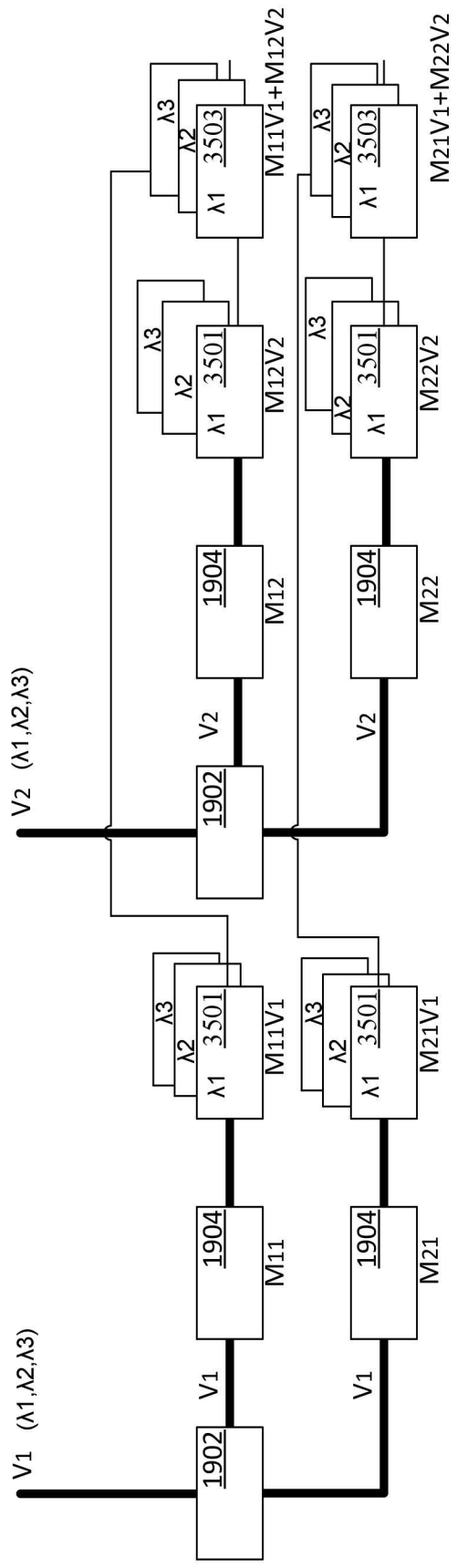




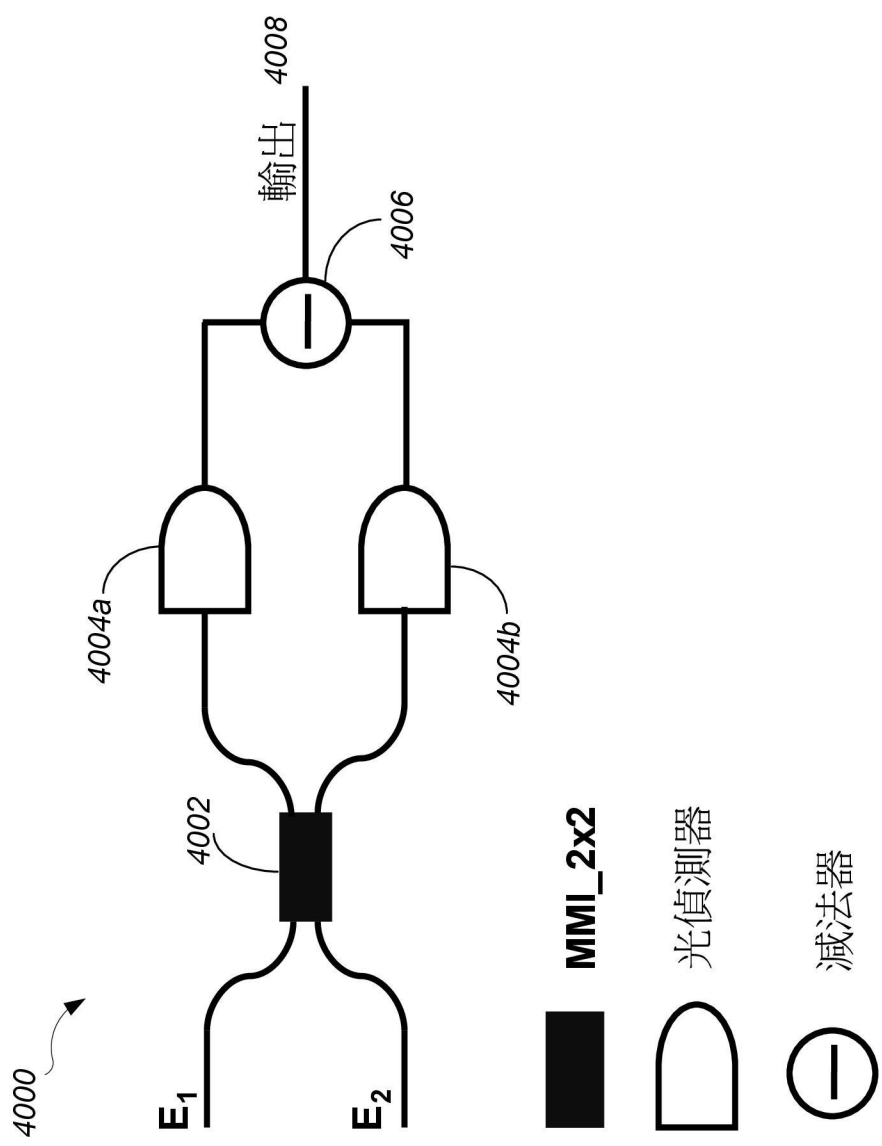
光電矩陣乘法(OMM)單元 3520

第 40 圖

3500

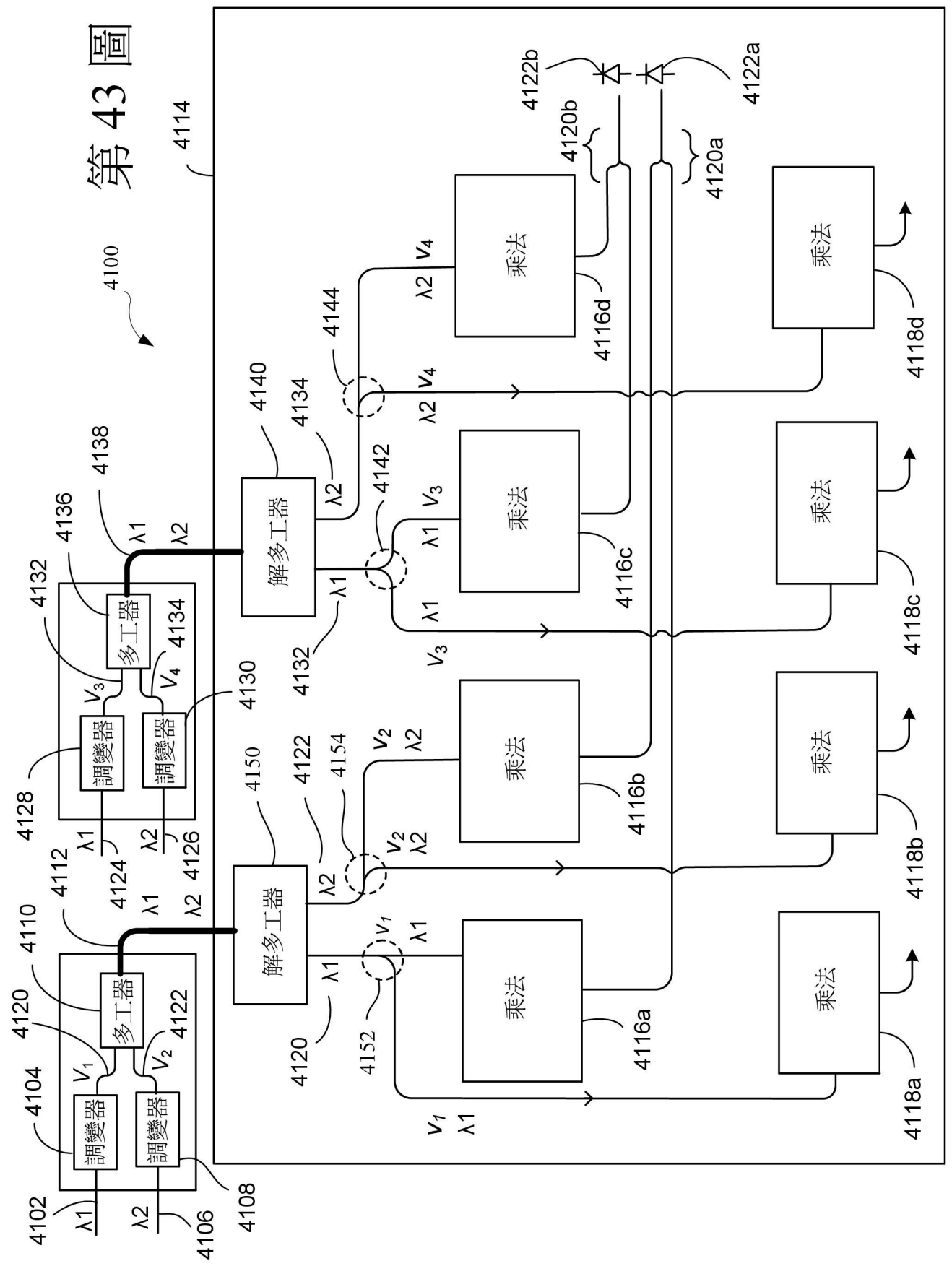


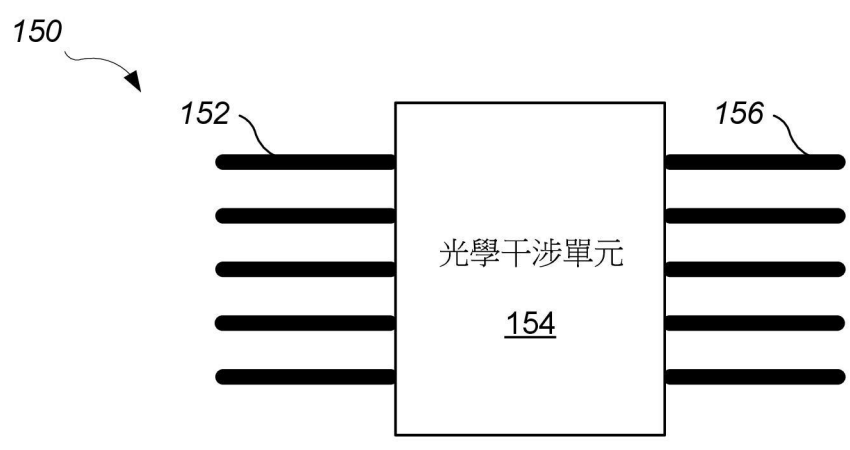
第41圖



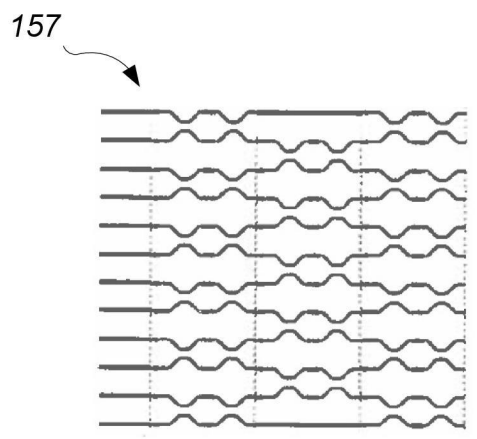
第 42 圖

第43圖

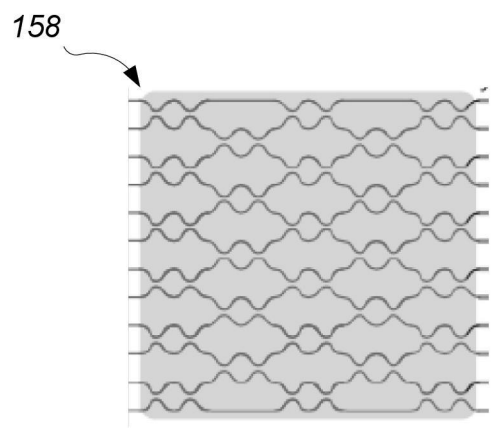




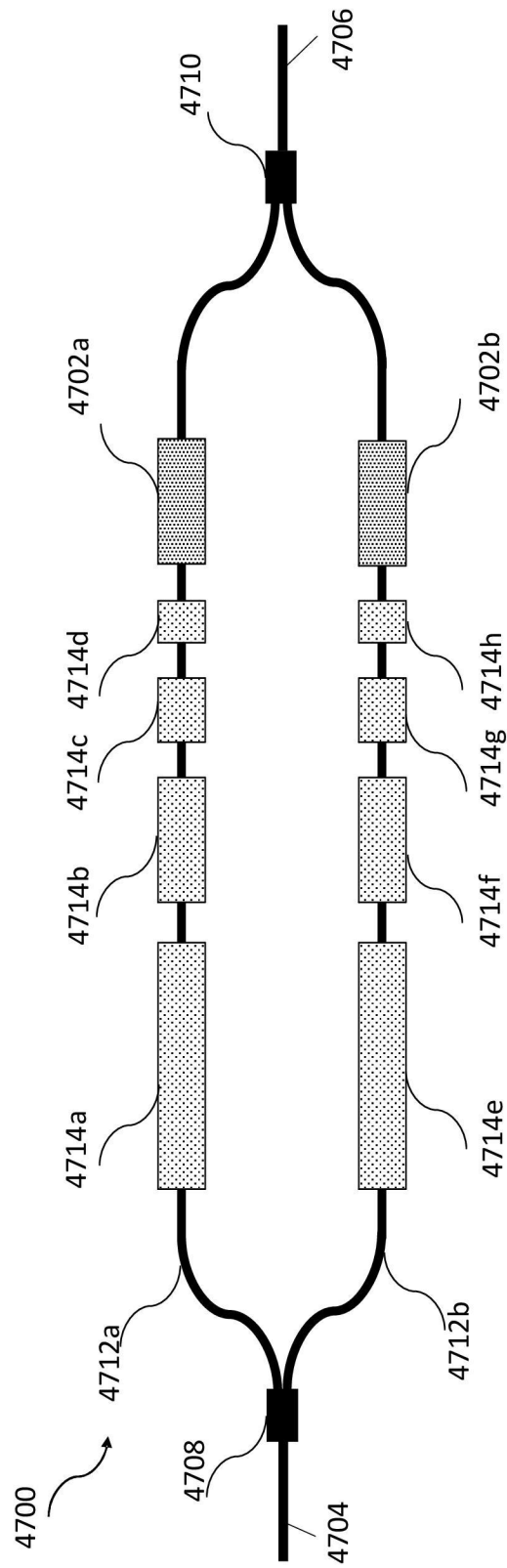
第 44 圖



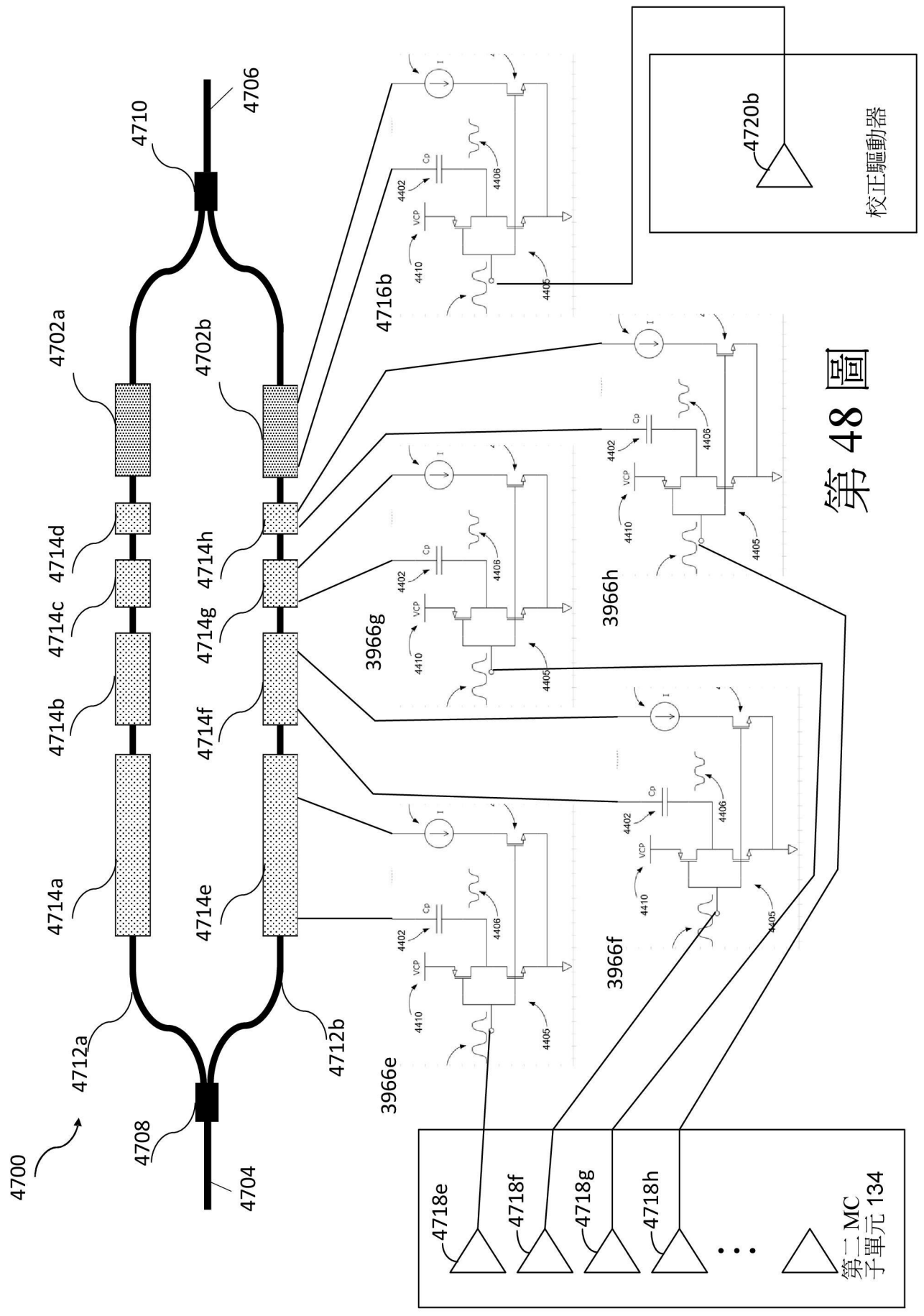
第 45 圖



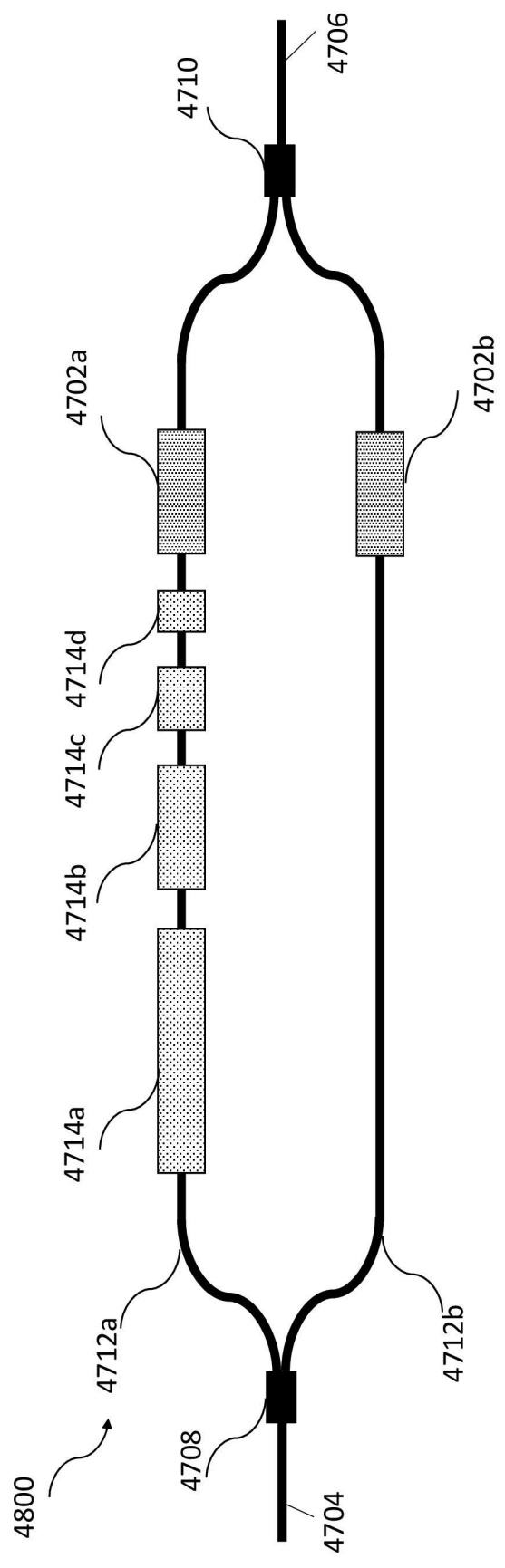
第 46 圖



第47圖

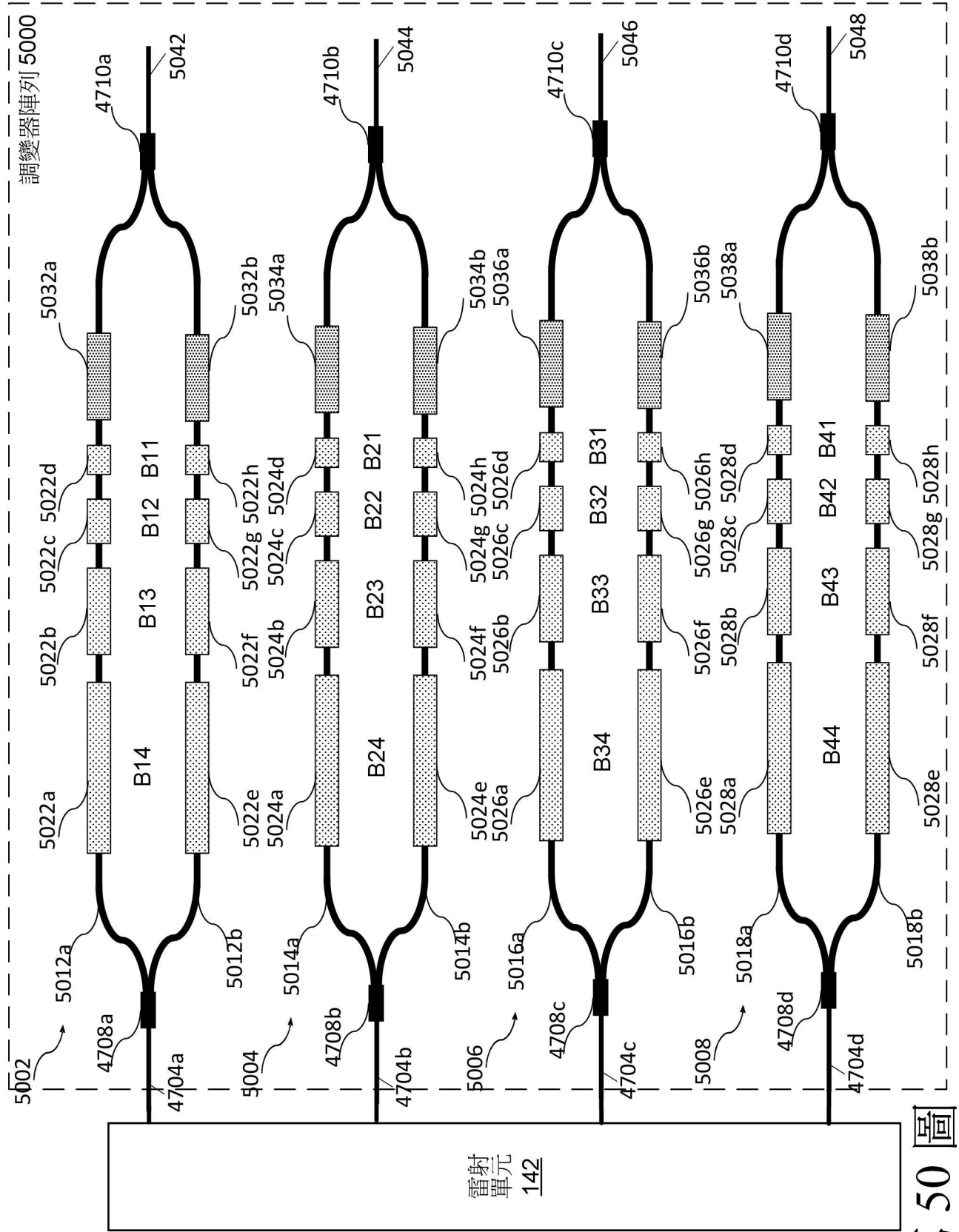


第48圖

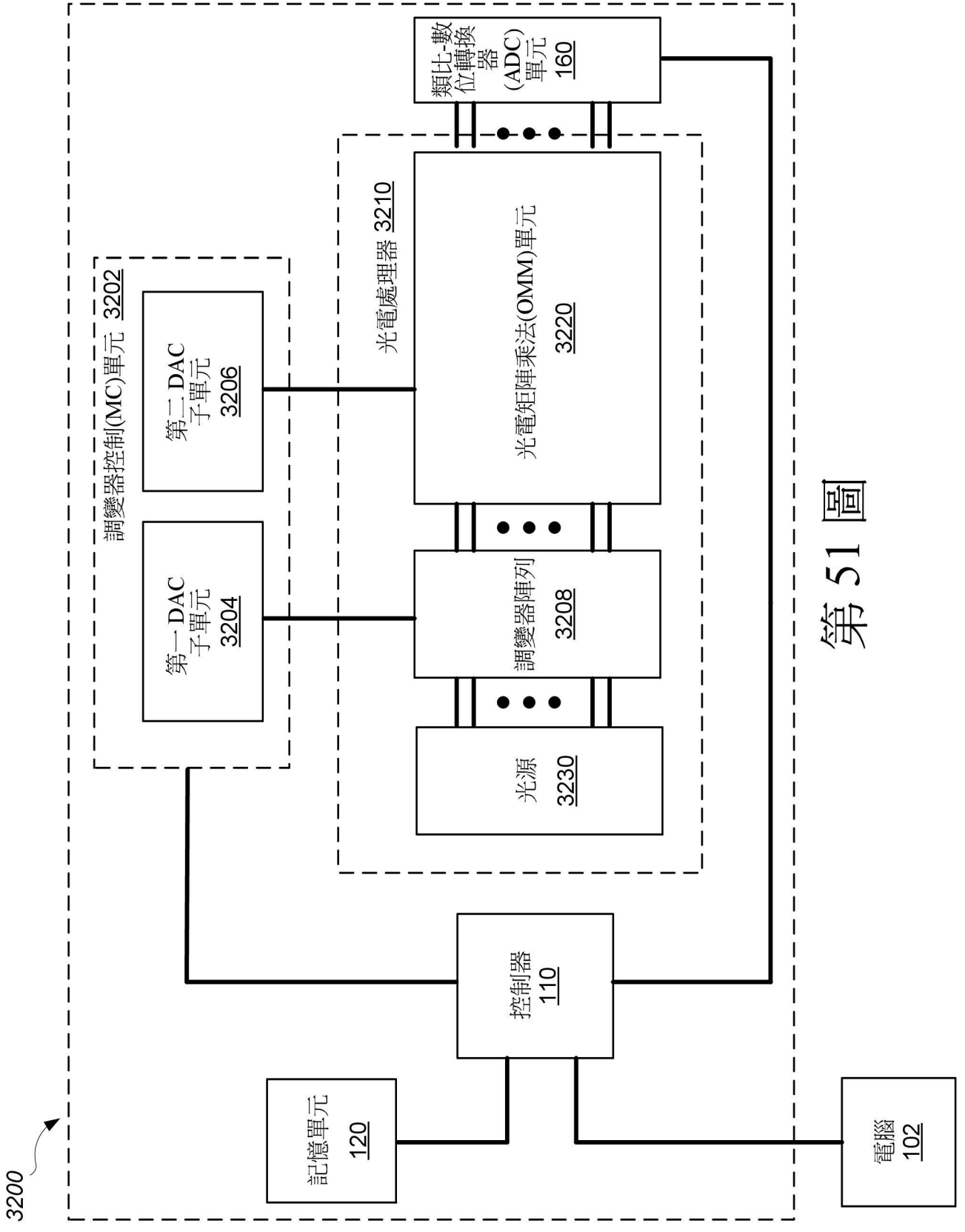


第 49 圖

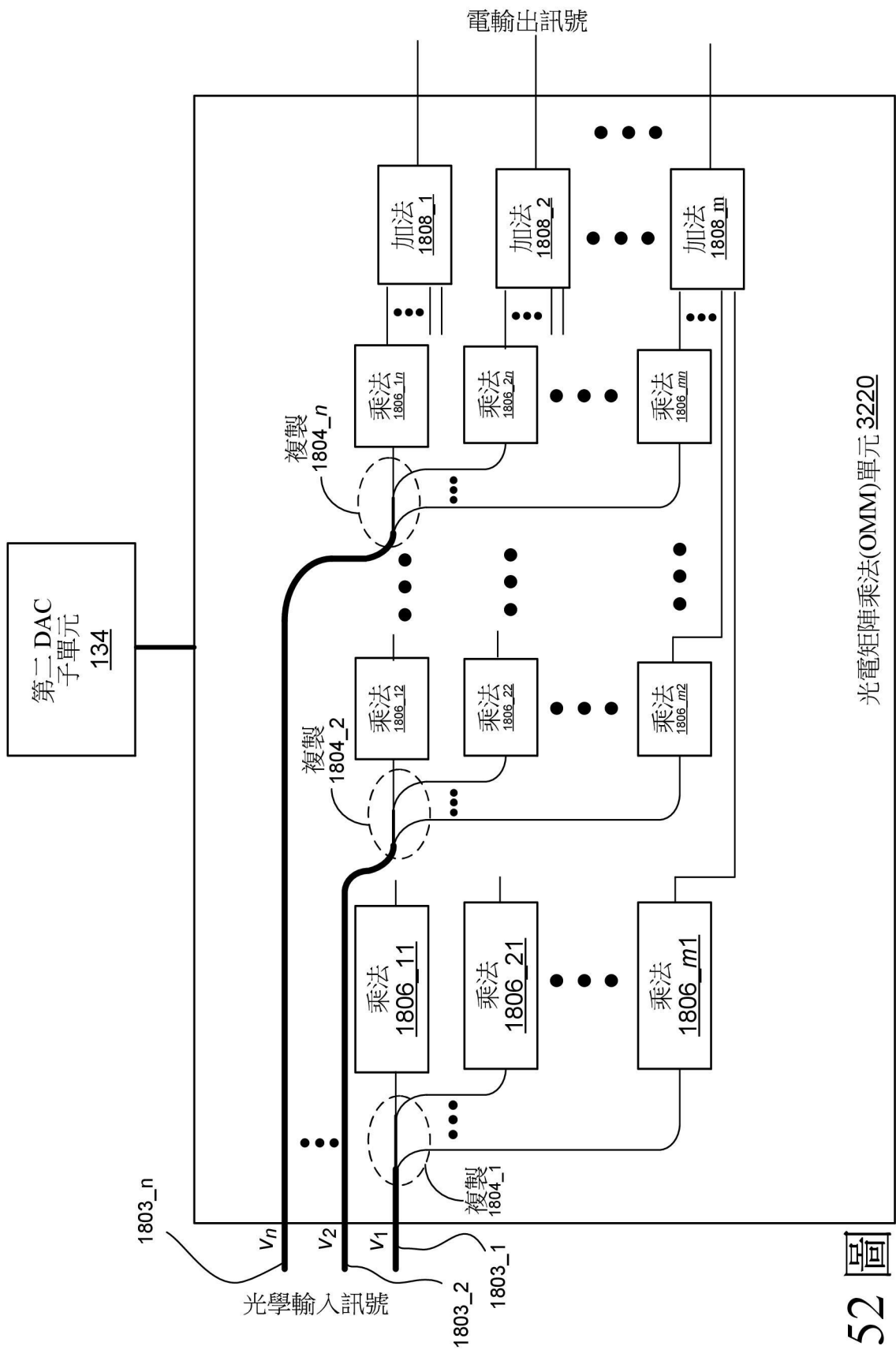




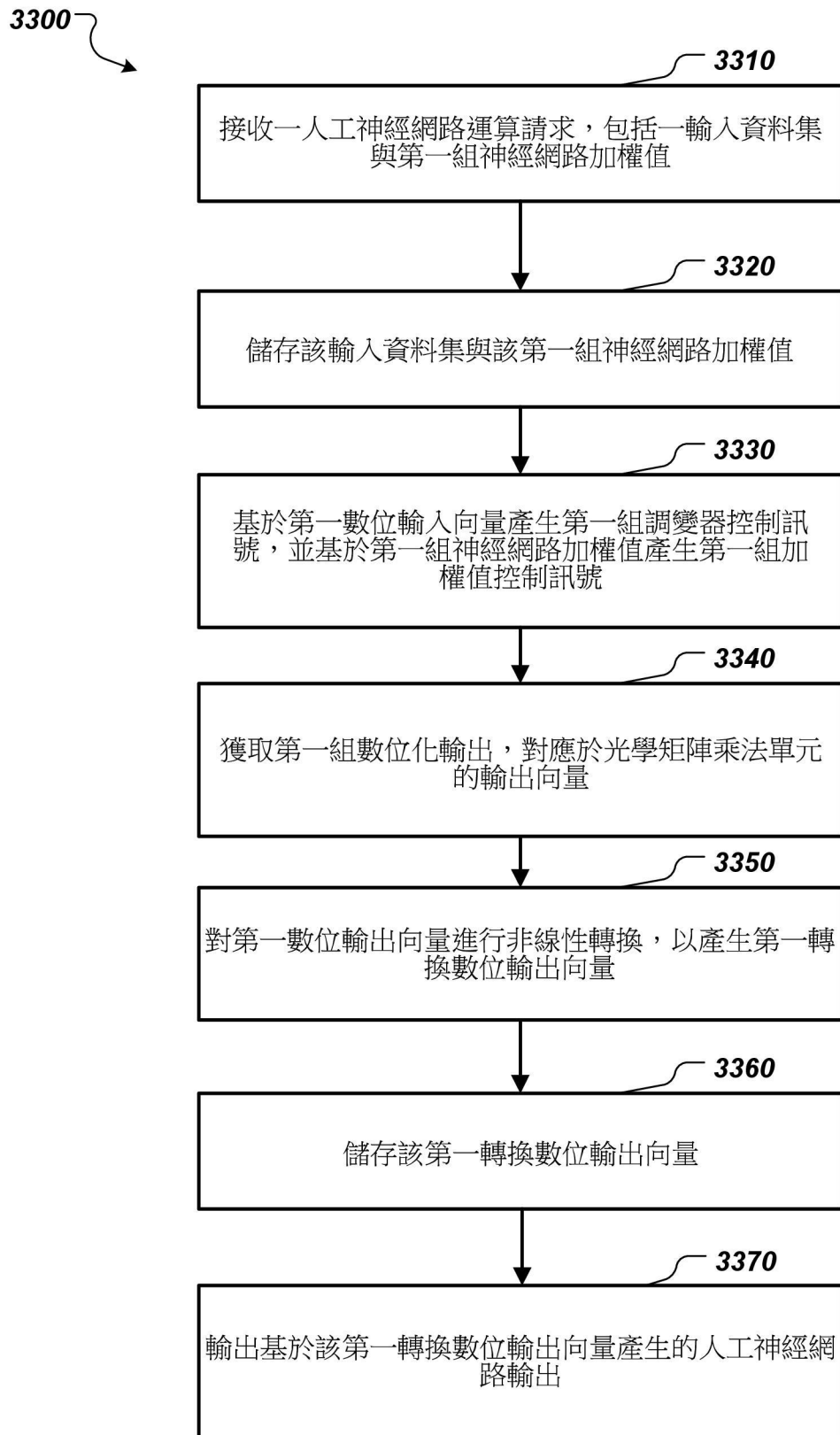
第 50 圖



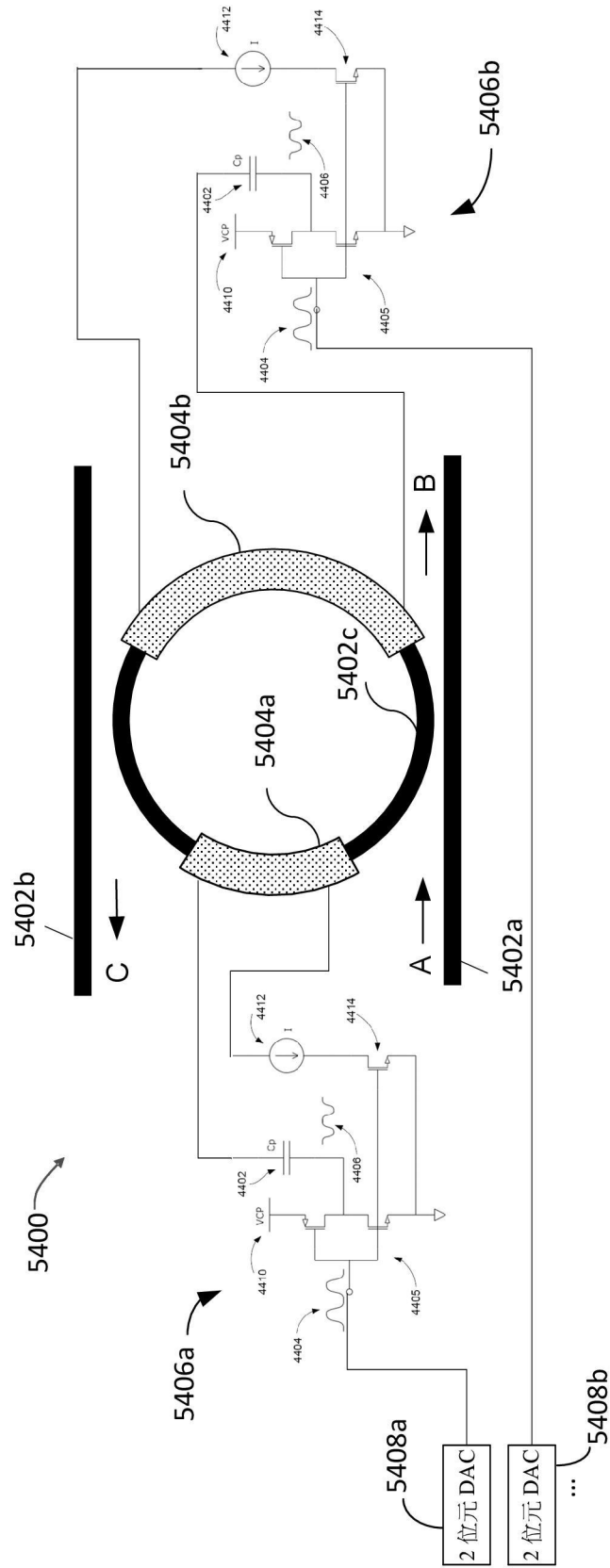
第 51 圖



第 52 圖 光電矩陣乘法(OMM)單元 3220



第 53 圖



第 54 圖