I719723

(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 I719723 B**

(45)公告日： 中華民國 110 (2021) 年 02 月 21 日

(21)申請案號：108142255　(22)申請日： 中華民國 108 (2019) 年 11 月 21 日

(51)Int. Cl.：　*G01J11/00　(2006.01)*

(30)優先權：2018/11/29　美國　62/773,087

2019/10/17　美國　16/656,424

(71)申請人：台灣積體電路製造股份有限公司 (中華民國) TAIWAN SEMICONDUCTOR MANUFACTURING CO., LTD.　(TW)

新竹市力行六路八號

(72)發明人：殷勤 YIN, CHIN (TW) ；葉尚府 YEH, SHANG-FU (TW) ；趙亦平 CHAO, CALVIN YI-PING (TW) ；李其霖 LEE, CHIH-LIN (TW) ；吳孟修 WU, MENG-HSIU (TW)

(74)代理人：卓俊傑

(56)參考文獻：

TW　201640661A　TW　201822491A

US　2013/0062522A1　US　2017/0052065A1

US　2017/0184704A1

審查人員：張耕誌

申請專利範圍項數：10 項　圖式數：8　共 53 頁

(54)名稱

用於飛行時間感測的系統與方法

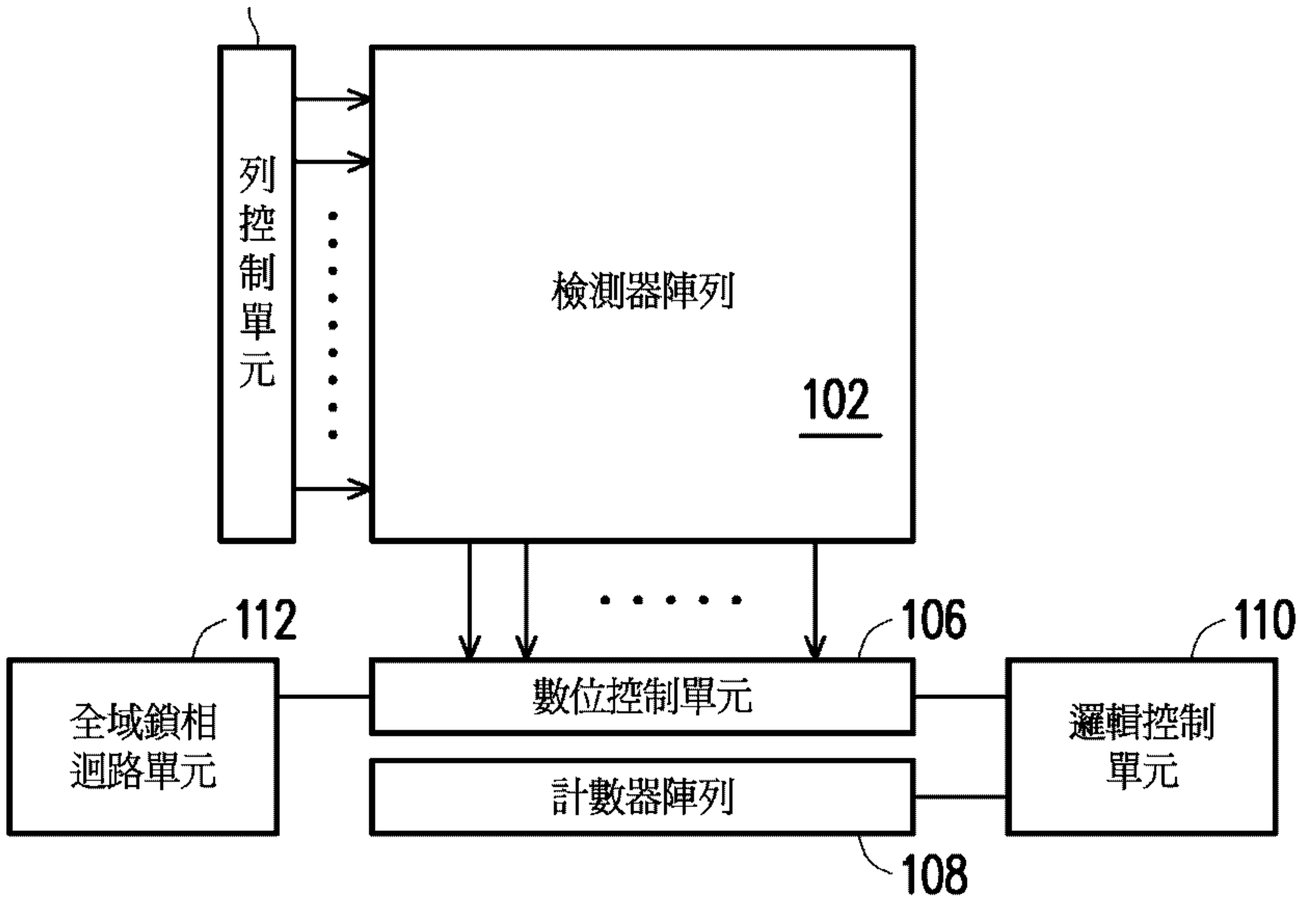
(57)摘要

公開一種飛行時間感測設備和方法。在一個實施例中，一種用於飛行時間(TOF)感測的系統，包括：檢測器陣列，包括多個單光子雪崩檢測器(SPAD)；以及控制電路，包括耦合到檢測器陣列的至少兩個數位控制陣列、耦合到至少兩個數位控制陣列的計數器陣列以及耦合到計數器陣列和至少兩個數位控制陣列的邏輯控制單元，其中檢測器陣列配置成從目標接收至少一個反射光脈衝，其中控制電路的第一數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元配置成從多個 SPAD 中的每一個接收至少一個雪崩脈衝以在第一 TOF 模式下確定檢測器陣列與目標之間的第一距離，且其中控制電路的第二數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元配置成從多個 SPAD 中的每一個接收至少一個雪崩脈衝以在第二 TOF 模式下確定檢測器陣列與目標之間的第二距離。

Disclosed is a time-of-flight sensing apparatus and method. In one embodiment, a system for time-of-flight (TOF) sensing, comprising: a detector array comprising a plurality of single-photon avalanche detectors (SPADs); and a control circuit comprising at least two digital control arrays coupled to the detector array, a counter array coupled to the at least two digital control arrays, and a logical control unit coupled to the counter array and the at least two digital control arrays, wherein the detector array is configured to receive at least one reflected light pulse from a target, wherein a first digital control array, the counter array, and the logical control unit of the control circuit are configured to receive at least one avalanche pulses from each of the plurality of SPADs to determine a first distance between the detector array and the target in a first TOF mode, and wherein a second digital control array, the counter array, and the logical control unit

of the control circuit are configured to receive the at least one avalanche pulse from the each of the plurality of SPADs to determine a second distance between the detector array and the target in a second TOF mode.

指定代表圖：



符號簡單說明：

100:飛行時間感測系統

102:檢測器陣列

104:列控制單元

106:數位控制單元

108:計數器陣列單元

110:邏輯控制單元

112:全域鎖相迴路單元

【圖1】

專利案號：108142255

公告本

109年09月22日 所提修正

109-9-22

I719723

【發明摘要】

【中文發明名稱】用於飛行時間感測的系統與方法

【英文發明名稱】SYSTEM AND METHOD FOR TIME-OF-FLIGHT SENSING

【中文】公開一種飛行時間感測設備和方法。在一個實施例中，一種用於飛行時間（TOF）感測的系統，包括：檢測器陣列，包括多個單光子雪崩檢測器（SPAD）；以及控制電路，包括耦合到檢測器陣列的至少兩個數位控制陣列、耦合到至少兩個數位控制陣列的計數器陣列以及耦合到計數器陣列和至少兩個數位控制陣列的邏輯控制單元，其中檢測器陣列配置成從目標接收至少一個反射光脈衝，其中控制電路的第一數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元配置成從多個SPAD中的每一個接收至少一個雪崩脈衝以在第一TOF模式下確定檢測器陣列與目標之間的第一距離，且其中控制電路的第二數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元配置成從多個SPAD中的每一個接收至少一個雪崩脈衝以在第二TOF模式下確定檢測器陣列與目標之間的第二距離。

【英文】 Disclosed is a time-of-flight sensing apparatus and method. In one embodiment, a system for time-of-flight (TOF) sensing, comprising: a detector array comprising a plurality of single-photon avalanche detectors (SPADs); and a control circuit

comprising at least two digital control arrays coupled to the detector array, a counter array coupled to the at least two digital control arrays, and a logical control unit coupled to the counter array and the at least two digital control arrays, wherein the detector array is configured to receive at least one reflected light pulse from a target, wherein a first digital control array, the counter array, and the logical control unit of the control circuit are configured to receive at least one avalanche pulses from each of the plurality of SPADs to determine a first distance between the detector array and the target in a first TOF mode, and wherein a second digital control array, the counter array, and the logical control unit of the control circuit are configured to receive the at least one avalanche pulse from the each of the plurality of SPADs to determine a second distance between the detector array and the target in a second TOF mode.

【指定代表圖】圖1。

【代表圖之符號簡單說明】

100：飛行時間感測系統

102：檢測器陣列

104：列控制單元

106：數位控制單元

108：計數器陣列單元

110：邏輯控制單元

112：全域鎖相迴路單元

【特徵化學式】

無

【發明說明書】

【中文發明名稱】用於飛行時間感測的系統與方法

【英文發明名稱】SYSTEM AND METHOD FOR TIME-OF-FLIGHT SENSING

【技術領域】

【0001】 本發明實施例是有關於一種用於飛行時間感測的系統與方法。

【先前技術】

【0002】 可在如 3D 成像的應用中使用由單色或寬光譜光源所產生的光線的飛行時間（Time-of-flight，TOF）測量。所述測量是基於對從由源經目標反射到檢測器的光的檢測。存在測量 TOF 的至少兩種技術：直接方法和間接方法。在直接方法中，評估與光源同步的起始（START）脈衝與由檢測器產生的終止（STOP）信號之間的時間差。在間接方法中，發射連續正弦光波並測量傳出信號與傳入信號之間的相位差，所述相位差用於使用預定義演算法來確定時間差。單光子雪崩二極體（Single-photon avalanche diode，SPAD）是能夠以極高飛行時間解析度捕獲個別光子的檢測器。然而，SPAD 通常具有高功率消耗，且難以在用於直接和間接 TOF 方法中的較寬檢測範圍內實現高解析度深度圖（depth map）。本公開利用一種用於基於單光子雪崩二極體的具有高動態

範圍的混合 TOF 感測器的方法和設備。

【發明內容】

【0003】 本申請的一些實施例提供一種用於飛行時間（TOF）感測的系統，包括：檢測器陣列，包括多個單光子雪崩檢測器（SPAD）；以及控制電路，包括至少兩個數位控制陣列，耦合到所述檢測器陣列，計數器陣列，耦合到所述至少兩個數位控制陣列，以及邏輯控制單元，耦合到所述計數器陣列及所述至少兩個數位控制陣列，其中所述檢測器陣列配置成從目標接收至少一個反射光脈衝，其中所述控制電路的第一數位控制陣列、所述計數器陣列以及所述邏輯控制單元配置成從所述多個單光子雪崩檢測器中的每一個接收至少一個雪崩脈衝以在第一飛行時間模式下確定所述檢測器陣列與所述目標之間的第一距離，且其中所述控制電路的第二數位控制陣列、所述計數器陣列以及所述邏輯控制單元配置成從所述多個單光子雪崩檢測器中的所述每一個接收所述至少一個雪崩脈衝以在第二飛行時間模式下確定所述檢測器陣列與所述目標之間的第二距離。

【0004】 此外，本申請的其他實施例提供一種用於飛行時間（TOF）感測的方法，包括：由檢測器陣列從目標接收至少一個反射光脈衝；從所述檢測器陣列中的多個單光子雪崩檢測器中的每一個產生至少一個雪崩脈衝；在第一飛行時間模式下確定第一距離；將時間與預定參考時間進行比較；回應於大於所述預定參

考時間的所述時間，從所述第一飛行時間模式切換到第二飛行時間模式；以及在所述第二飛行時間模式下確定第二距離，其中所述檢測器陣列配置成從目標接收至少一個反射光脈衝，其中所述確定第一距離由控制電路的第一數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元執行，且其中所述確定第二距離由所述控制電路的第二數位控制陣列、所述計數器陣列以及所述邏輯控制單元執行。

【0005】 另外，本申請的其他實施例提供一種用於飛行時間（TOF）感測的系統，包括：光源，配置成向目標發射至少一個光脈衝；檢測器陣列，包括多個單光子雪崩檢測器（SPAD），其中所述檢測器配置成從所述目標接收至少一個反射光脈衝；第一數位控制陣列，包括 N 個對應邊緣檢測器；計數器陣列，包括耦合到所述第一數位控制陣列的所述 N 個對應邊緣檢測器的 N 個計數器；邏輯控制單元，耦合到配置成在第一飛行時間模式下確定第一距離的所述計數器陣列，其中 N 是正整數，且 N 等於或大於 4。

【圖式簡單說明】

【0006】 結合附圖閱讀以下詳細描述會最佳地理解本公開的各方面。應注意，各種特徵未必按比例繪製。實際上，出於說明清楚起見，可任意增大或減小各種特徵的尺寸和幾何結構。

圖 1 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系

統的示例性方塊圖。

圖 2 是根據本公開的一些實施例的單光子雪崩檢測器（SPAD）的示例性電路圖。

圖 3A 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系統的示例性電路圖。

圖 3B 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系統的 4 位元數目器的示例性電路。

圖 4 是根據本公開的一些實施例的在 DTOF 模式下操作的飛行時間（TOF）感測系統中的信號的波形。

圖 5 是根據本公開的一些實施例的在 ITOF 模式下操作的飛行時間（TOF）感測系統的信號的波形。

圖 6 是根據本公開的一些實施例的使用 TOF 感測系統來執行飛行時間（TOF）測量的方法的流程圖。

圖 7 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系統的示例性電路圖。

圖 8 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系統的示例性電路圖。

【實施方式】

【0007】 以下公開內容描述用於實施主題的不同特徵的各種示例性實施例。下文描述元件和佈置的特定實例來簡化本公開。當然，這些特定實例只是實例且並不意圖為限制性的。舉例來說，

應理解，當元件被稱作“連接到”或“耦合到”另一元件時，其可直接連接到或耦合到另一元件，或可存在一或多個介入元件。

【0008】 本公開呈現用於執行飛行時間（TOF）測量的設備和方法的各種實施例。可在直接 TOF 模式下和間接 TOF 模式下操作的 TOF 系統提供例如高動態範圍的優勢。

【0009】 圖 1 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系統 100 的示例性方塊圖。應注意，TOF 感測系統 100 僅為一實例，且不意圖限制本公開。因此，應理解，額外功能塊可設置在圖 1 的 TOF 感測系統 100 中或耦合到 TOF 感測系統 100，且一些其它功能塊可在本文中僅簡要描述。

【0010】 在所示出的實施例中，TOF 感測系統 100 包括檢測器陣列 102、列控制單元 104、數位控制單元 106、計數器陣列單元 108、邏輯控制單元 110 以及全域鎖相迴路（phase-locked-loop，PLL）單元 112。在一些實施例中，檢測器陣列 102 包括呈行列配置的多個單光子雪崩檢測器（single-photon avalanche detector，SPAD）。

【0011】 在一些實施例中，列控制單元 104 配置成接收檢測器陣列 102 的列地址且啟用所述列地址中的檢測器。在一些實施例中，數位控制單元 106 包括兩個元件，其中數位控制單元 106 的第一元件配置成作為多工器以在系統在間接飛行時間（ITOF）模式下工作時將 SPAD 輸入脈衝分成同相計數器和異相計數器，且數位控制單元 106 的第二元件配置成作為時間-數位轉換器

（time-to-digical converter）以在系統在直接飛行時間（DTOF）模式下工作時獲取雷射起始脈衝與來自檢測器陣列（例如SPAD）102的至少一個雪崩脈衝之間的時間差。在一些實施例中，數位控制單元106的第一元件和第二元件各自包括多個子單元，所述多個子單元中的每一個耦合到檢測器陣列102的行，如下文進一步詳細討論。

【0012】 在一些實施例中，計數器陣列108配置成在系統在ITOF模式下工作時對同相/異相部分的輸入脈衝數目進行計數，且在系統在DTOF模式下工作時對時間差進行計數。在一些實施例中，計數器陣列108耦合到數位控制單元106的第一元件和第二元件。在一些實施例中，計數器陣列108包括多個計數器單元，所述多個計數器單元中的每一個耦合到數位控制單元106的第一元件和第二元件中的一個子單元，如下文進一步詳細討論。

【0013】 在一些實施例中，數位控制單元106和計數器陣列108通過邏輯控制單元110耦合在一起。在一些實施例中，邏輯控制單元110配置成根據計數器陣列108的輸出確定數位控制單元106的輸入，這在下文於圖3A中詳細討論。

【0014】 在一些實施例中，全域PLL單元112配置成在系統在DTOF模式下工作時為計數器陣列108提供高頻時鐘。

【0015】 圖2是根據本公開的一些實施例的單光子雪崩檢測器（SPAD）200的示例性電路圖。SPAD 200包括光電二極體202，所述光電二極體依賴於碰撞游離效應（impact ionization

effect）來倍增光生電子和電洞。在一些實施例中，光電二極體 202 可在矽晶片中或通過標準互補型金屬氧化物半導體（Complementary metal-oxide-semiconductor，CMOS）製造製程來製作。在一些實施例中，光電二極體 202 可使用第 III 族到第 V 族半導體材料來製作。在一些實施例中，光電二極體 202 的端子 210 在擊穿電壓（V_{BD}）206 下偏置以允許光電二極體 202 在擬穩態（pseudo-steady-state）條件下操作，在所述擬穩態條件中，在光電二極體 202 的耗盡區中不存在載流子。當在光電二極體 202 處接收到光子時，可產生載流子（例如電子和電洞）且將所述載流子注入到耗盡區，從而導致碰撞游離和雪崩。在一些實施例中，VBD 206 在-30 V 到-40 V 的範圍內。

【0016】 在所示出的實施例中，光電二極體 202 的端子 212 通過電晶體 204 進一步耦合到過量偏置電壓（excessive bias voltage）（V_E）。在一些實施例中，V_E 在 1 V 到 5 V 的範圍內。在一些實施例中，V_E 預設為 3.3 V。電晶體 204 的汲極端子耦合到光電二極體 202 的端子 212，電晶體 204 的源極端子耦合到 V_E，且電晶體 204 的閘極端子耦合到淬滅電壓（quench voltage）（V_Q）。當 V_Q 與 V_E 之間的電壓差大於電晶體 204 的閾值電壓時，電晶體 204 接通，從而在光電二極體 202 的兩個端子 210 與端子 212 之間產生較大電壓差。在一些實施例中，電晶體 204 作為具有恒定有效電阻值的恒定電流源。當在光電二極體 202 上接收到反射光且觸發雪崩效應時，產生大量下拉電流，從而使得電晶體 204 的

汲極端子和端子 212 由於電晶體 204 的電阻而立即變低。在一些實施例中，電晶體 204 為 PMOS 淬滅電晶體（quench transistor）。在一些實施例中，電晶體 204 的電阻值可通過調節 V_Q 值來調節。在一些實施例中，當觸發光電二極體 202 上的雪崩效應時，V_Q 值的變化還可導致在端子 212 處的變低轉換速率的改變。

【0017】 在所示出的實施例中，光電二極體 202 的端子 212 耦合到反相器 208。在一些實施例中，反相器 208 配置成將雪崩脈衝準位轉換且重塑成邏輯核心電壓脈衝。在一些實施例中，反相器 208 包括串聯耦合在一起的多個反相器單元。在一些實施例中，由於來自 SPAD 高電壓的可靠性問題，反相器 208 中的第一反相器單元更包括具有邏輯核心電壓電源的高壓（例如 I/O 電壓）電晶體。反相器 208 中的反相器單元的其餘部分各自包括邏輯核心電壓電晶體，且配置成為後續時間-數位轉換器（time-to-digital converter，TDC）電路重塑雪崩脈衝。

【0018】 圖 3A 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系統 300 的示例性電路圖。在一些實施例中，TOF 感測系統 300 包括邏輯控制單元 106 的子單元 302 和計數器陣列 108 的計數器單元 304。在一些實施例中，TOF 感測系統 300 耦合到 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行以用於接收雪崩脈衝，且進一步耦合到邏輯控制單元 110 以用於確定距離以及確定系統的模式。

【0019】 在一些實施例中，邏輯控制單元 106 的子單元 302 包括 2 個元件：第一元件 306 和第二元件 308。在一些實施例中，計數器單元 304 包括兩個計數器 314，包含第一計數器 314-1 和第二計數器 314-2。在一些實施例中，第一計數器和第二計數器各自耦合到第一元件 306 和第二元件 308。

【0020】 在一些實施例中，第一元件 306 包括兩個相同的數位開關，其中兩個相同的數位開關各自包括反相器 310、鎖存器 314 以及與閘 318。具體地說，第一數位開關包括第一反相器 310-1、第一鎖存器 314-1 以及第一與閘 318-1；且第二數位開關包括第二反相器 310-2、第二鎖存器 314-2 以及第二與閘 318-2。類似地，第二元件 308 包括兩個相同的電路，其中兩個相同的電路各自包括 D-正反器（D-flip flop，DFF）電路 312 和鎖存器 314。具體地說，第二元件 308 的第一電路包括第一 DFF 電路 312-1 和第三鎖存器 314-3；且第二電路包括第二 DFF 電路 312-2 和第四鎖存器 314-4。在一些實施例中，第一元件 306 的第一與閘 318-1 和第二元件 308 的第三鎖存器 314-3 的輸出都耦合到第一計數器 316-1。在一些實施例中，第一元件 306 的第二與閘 318-2 和第二元件 308 的第四鎖存器 314-4 的輸出都耦合到第二計數器 316-2。

【0021】 在所示出的實施例中，第一元件 306 中的第一鎖存器 314-1 的端子 D 接收輸入脈衝信號（即同相脈衝）；第一元件 306 中的第一鎖存器 314-1 的端子 E 通過第一反相器 310-1 從 SPAD

陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第一元件 306 中的第一鎖存器 314-1 的端子 Q 和來自 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行的輸入脈衝信號進一步耦合到第一與閘 318-1。類似地，第一元件 306 中的第二鎖存器 314-2 的端子 D 接收輸入脈衝信號（即異相脈衝）；第一元件 306 中的第二鎖存器 314-2 的端子 E 通過第二反相器 310-2 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第一元件 306 中的第二鎖存器 314-2 的端子 Q 和來自 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行的輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）進一步耦合到第二與閘 318-2。在所示出的實施例中，第一與閘 318-1 和第二與閘的輸出端子進一步分別耦合到第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2。

【0022】 在所示出的實施例中，首先將所有邏輯電路重定。第二元件 308 的第一 DFF 電路 312-1 的端子 D 固定成邏輯“高”信號；第二元件 308 的第一 DFF 電路 312-1 的端子 C 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雷射起始光脈衝）；且第二元件 308 的第一 DFF 電路 312-1 的端子反相 Q（Q-bar）耦合到第二元件 308 的第三鎖存器 314-3 的端子 E。在所示出的實施例中，第二元件 308 的第三鎖存器 314-3 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第二元件 308 的第三鎖存器 314-3 的端子 Q 最終耦合到第一計數器 316-1。類似地，第二元件 308 的第二 DFF 電路 312-2 的端子 D 固定成邏輯

“高”信號；第二元件 308 的第二 DFF 電路 312-2 的端子 C 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第二元件 308 的第二 DFF 電路 312-2 的端子反相 Q 耦合到第二元件 308 的第四鎖存器 314-4 的端子 E。在所示出的實施例中，第二元件 308 的第四鎖存器 314-4 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第二元件 308 的第四鎖存器 314-4 的端子 Q 最終耦合到第二計數器 316-2。

【0023】 在一些實施例中，第一元件 306 配置成操作為邏輯多工器。舉例來說，在同相週期（例如在第一鎖存器 314-1 的端子 D 上同相脈衝較高且在第二鎖存器 314-2 的端子 D 上異相脈衝較低的週期）期間，來自行中的 SPAD 200 的輸入雪崩脈衝通過第一元件 306 的第一鎖存器 314-1 和第一與閘 318-1 以及通過第二元件 308 的第一 DFF 電路 312-1 和第三鎖存器 314-3 全部輸出到第一計數器 316-1 中。類似地，在異相週期（例如在第一鎖存器 314-1 的端子 D 上同相脈衝較低且在第二鎖存器 314-2 的端子 D 上異相脈衝較高的週期）期間，來自行中的 SPAD 200 的所有雪崩脈衝隨後通過第一元件 306 的第二鎖存器 314-2 和第二與閘 318-2 以及通過第二元件 308 的第二 DFF 電路 312-2 和第四鎖存器 314-4 輸出到第二計數器 316-2 中。在一些實施例中，第一元件 306 配置為“閘控時鐘鎖存器”（Gated Clock Latch）以防止發生在同相時鐘與異相時鐘之間的邊緣處的干擾問題。在一些實施例中，例如當端子 D 和端子 E 在第一元件 306 上都較高時，第

一元件 306 允許將兩相（即同相脈衝和異相脈衝）的邊緣處的輸入雪崩脈衝僅計數到第一計數器 316-1 中。

【0024】 在一些實施例中，第二元件 308 配置成操作為信號邊緣檢測器（signal edge detector）。舉例來說，當在第一 DFF 電路 312-1 上接收到雷射起始光脈衝時，CLK 脈衝由第三鎖存器 314-3 阻擋，且第三鎖存器 314-3 的輸出端子從高切換到低（即終止計數器 1）；且當在第二 DFF 電路 312-2 上接收到輸入雪崩脈衝時，CLK 脈衝由第四鎖存器 314-4 阻擋，且第四鎖存器 314-4 的輸出端子從高切換到低（即終止計數器 2）。

【0025】 在所示出的實施例中，邏輯控制單元從第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 接收信號，以根據以下等式來確定當系統在 ITOF 模式下操作（即計數器從第一元件 306 接收信號）時的距離：

【0026】 $D_1 = \left(\frac{cT_{AP}}{2}\right) \times \frac{計數器\ 2}{計數器\ 1+計數器\ 2}$

【0027】 其中 D_1 是光源與反射入射光的目標之間的距離；c 是光速；T_{AP} 是同相脈衝或異相脈衝的脈衝寬度；且計數器 1 和計數器 2 是分別來自第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 的輸出。

【0028】 在所示出的實施例中，邏輯控制單元從第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 接收信號，以根據以下等式來確定當系統在 DTOF 模式下操作（即計數器從第二元件 308 接收信號）時的距離：

【0029】 $D_2 = \left(\frac{cT_{CLK}}{2}\right) \times (計數器\ 2 - 計數器\ 1)$

【0030】 其中 D_2 是光源與反射入射光的目標之間的距離；c 是光速；T_{CLK} 是 CLK 脈衝的週期；且計數器 1 和計數器 2 是分別來自第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 的輸出。

【0031】 在一些實施例中，邏輯電路 110 首先通過啟用來自全域 PLL 單元 112 的 CLK 脈衝來啟用第二元件 308，且禁用第一元件 306 上的輸入脈衝（即同相脈衝和異相脈衝），從而允許系統在 DTOF 模式下操作。當(計數器 2-計數器 1)的值大於 N（其中 N 是預定正整數）時，邏輯控制單元 110 繼續允許系統在 DTOF 模式下操作；且當(計數器 2-計數器 1)的值小於 N 時，邏輯控制單元 110 禁用第二元件 308 的 CLK 輸入且啟用第一元件 306 的輸入脈衝，從而允許系統在 ITOF 模式下操作。在一些實施例中，N 的預設值等於 1。

【0032】 圖 3B 是根據本公開的一些實施例的 4 位元數目器的示例性電路 316。在所示出的實施例中，計數器 316 包括 4 個 DFF 電路 320，包含第一 DFF 電路 FF0 320-1、第二 DFF 電路 FF1 320-2、第三 DFF 電路 FF2 320-3 以及第四 DFF 電路 FF3 320-4。雖然在 4 位元數目器的示例性電路中使用 4 個 DFF 電路 320，但應注意，任何數量（N）的 DFF 電路可包含於 N 位元數目器中且在本發明的範圍內。

【0033】 在所示出的實施例中，四個 DFF 電路 320 中的每一個的端子 D 和端子反相 Q 耦合在一起。第一 DFF 電路 320-1、第二 DFF 電路 320-2 以及第三 DFF 電路 320-3 的端子反相 Q 分別耦合

到第二 DFF 電路 320-2、第三 DFF 電路 320-3 以及第四 DFF 電路 320-4 的端子 CK。第一 DFF 電路 320-1 的端子 CK 耦合到 CLK 信號。四個 DFF 電路 320 的端子 Q 分別耦合到輸出 Q0、輸出 Q1、輸出 Q2 以及輸出 Q3。

【0034】 在操作期間，當未在第一 DFF 電路 320-1 的 CK 端子上從數位控制單元（例如第一元件 306 或第二元件 308）接收到脈衝時，端子 Q0、端子 Q1、端子 Q2 以及端子 Q3 各自輸出“0”。當在第一 DFF 電路 320-1 的 CK 端子上接收到第一脈衝時，端子 Q0、端子 Q1、端子 Q2 以及端子 Q3 分別輸出 1、0、0 以及 0；當在第一 DFF 電路 320-1 的 CK 端子上接收到第二脈衝時，端子 Q0、端子 Q1、端子 Q2 以及端子 Q3 分別輸出 0、1、0 以及 0；當在第一 DFF 電路 320-1 的 CK 端子上接收到第三脈衝時，端子 Q0、端子 Q1、端子 Q2 以及端子 Q3 分別輸出 0、0、1 以及 0；且當在第一 DFF 電路 320-1 的 CK 端子上接收到第四脈衝時，端子 Q0、端子 Q1、端子 Q2 以及端子 Q3 分別輸出 0、0、0 以及 1。

【0035】 圖 4 是根據本公開的一些實施例的在 DTOF 模式下操作的飛行時間（TOF）系統 300 中的信號的波形 400。在一些實施例中，當產生波形 400 時，TOF 系統 300 的操作由圖 1 到圖 3 中示出的相應組件來執行。出於討論的目的，將結合圖 1 到圖 3 來描述波形 400 的以下實施例。波形 400 的所示出實施例僅僅是用於產生來自 SPAD 陣列 102 的列和行（例如 200-4）中的一個

SPAD 200 的計數器的輸入的一實例。因此，可添加來自其它 SPAD 200 或來自重複測量的波形，同時保持在本公開的範圍內。

【0036】 當啟用 RSELI 402（即電壓準位變高）時，且當未在第一 DFF 電路 312 上接收到雷射起始光脈衝，且因此第三鎖存器和第四鎖存器 314-3/314-4 上的 E 端子沒有分別從第一 DFF 電路 312-1 和第二 DFF 電路 312-2 的反相 Q 端子接收到邏輯“低”信號時，第三鎖存器 314-3 和第四鎖存器 314-4 接通。在這種情況下，當第一 CLK 脈衝 404 在 t0 處開始到達第三鎖存器 314-3 和第四鎖存器 314-4 時，將 CLK 脈衝 404 同時引導到第一計數器 316-1 和 316-2，從而使得計數器 1 410 和計數器 2 412 在時間 t0 處從低切換到高。

【0037】 當在時間 t1 處在第一 DFF 電路 312-1 上接收到雷射起始光脈衝 406 的上升邊緣時，第一 DFF 電路 312-1 的反相 Q 端子上的電壓準位從高切換到低。第三鎖存器 314-3 的端子 E 上的低信號終止第三鎖存器 314-3 的端子 Q 上的 CLK 的輸出，從而導致第一計數器 316-1 的終止。在這種情況下，計數器 1 410 在時間 t1 處從高切換到低，而計數器 2 412 繼續。當在第二 DFF 電路 312-2 上接收到反射光脈衝 408 的上升邊緣時，第二 DFF 電路 312-2 的反相 Q 端子上的電壓準位從高切換到低。第四鎖存器 314-4 的端子 E 上的低信號終止第四鎖存器 314-4 的端子 Q 上的 CLK 的輸出，從而導致第二計數器 316-2 的終止。在這種情況

下，計數器 1 410 保持低，且計數器 2 412 在時間 t2 處從高切換到低。在一些實施例中，時間 t2 與時間 t1 之間的時間差決定計數器 2-計數器 1 的值，所述值可進一步用於確定當系統在 DTOF 模式下操作時的距離 D2。

【0038】 對於一實例，當 T_{CLK} 等於 1 奈秒（其可從以 1 吉赫操作的全域 PLL 單元 112 獲得）時，最小距離 $D2_min=\frac{3\times10^8\times1ns}{2}\times 1=0.15$ 米。當 TDC 長度是 9 位（其等於 $2^9=512$ 個碼）時，當系統在 DTOF 模式下操作時，最大距離 $D2_max=\frac{3\times10^8\times1ns}{2}\times 512=76.8$ 米。當輸入脈衝（即同相脈衝或異相脈衝）的週期等於 10 奈秒時，脈衝寬度為 5 奈秒。在這種情況下，當迴圈次數是 1000 時，最小距離 $D1_min=\frac{3\times10^8\times5ns}{2}\times\frac{1}{1000}=0.75$ 毫米，且最大距離 $D1_max=\frac{3\times10^8\times5ns}{2}\times\frac{1000}{1000}=0.75$ 米。通過能夠在 2 種不同模式（即 DTOF 模式和 ITOF 模式）下作業系統，可通過使用本公開中的方法和設備來提高動態範圍。

【0039】 圖 5 是根據本公開的一些實施例的在 ITOF 模式下操作的飛行時間（TOF）感測器 300 的信號的波形 500。在一些實施例中，當產生波形 500 時，TOF 系統 300 的操作由圖 1 到圖 3 中示出的相應組件來執行。出於討論的目的，將結合圖 1 到圖 3 來描述波形 500 的以下實施例。波形 500 的所示出實施例僅僅是用於產生來自 SPAD 陣列 102 的列和行（例如 200-4）中的一個 SPAD 200 的計數器的輸入的一實例。因此，可添加來自其它 SPAD 200 或來自重複測量的波形，同時保持在本公開的範圍

內。

【0040】 當啟用 RSELI 402（即電壓準位變高）時，且當在時間 t0 處在第一鎖存器 314-1 上接收到雷射起始光脈衝 406 的上升邊緣時。當 SPAD 200 在時間 t1 處的上升邊緣時接收到反射光脈衝 408，產生雪崩脈衝直到在時間 t3 處接收到反射光脈衝 408 的下降邊緣為止。在所示出的實施例中，由 SPAD 200 在反射光脈衝 408 的週期（即 t3 到 t1）內產生五個雪崩脈衝。應注意，5 個雪崩脈衝僅僅是一實例且不意圖為限制性的。雪崩脈衝的數量由 SPAD 200 和光脈衝 406 的週期來確定，且因此反射光脈衝 408 的週期和雪崩脈衝的任何數量在本發明的範圍內。

【0041】 當輸入脈衝 0（即同相脈衝）502 在時間 t0 處接收到且在時間 t2 處終止時，且當輸入脈衝 180（即異相脈衝）504 在時間 t2 處接收到且在時間 t4 處終止時，將 t2 與 t1 之間的時間週期內的雪崩脈衝（前 3 個脈衝）引導到第一計數器 316-1，從而在時間 t2 與時間 t1 之間在計數器 1 506 上產生 3 個脈衝。類似地，將時間 t3 與時間 t2 之間的時間週期內的雪崩脈衝（後 2 個脈衝）引導到第二計數器 316-2，從而在時間 t3 與時間 t2 之間在計數器 2 508 上產生 2 個脈衝。

【0042】 圖 6 是根據本公開的一些實施例的用以使用 TOF 感測系統 100 來執行飛行時間（TOF）測量的方法 600 的流程圖。在一些實施例中，方法 600 的操作由圖 1 到圖 3 中所示出的相應組件來執行。出於討論的目的，將結合圖 1 到圖 3 描述方法 600 的以

下實施例。方法 600 的所示出實施例僅僅是用於執行 TOF 測量的一實例。因此，應理解，多種操作中的任一種可省略、重新排序和/或添加，同時保持在本公開的範圍內。

【0043】 方法 600 以操作 602 開始，其中根據一些實施例產生至少一個光脈衝。在一些實施例中，從光源產生且發射至少一個光脈衝。在一些實施例中，至少一個光脈衝各自具有矩形波形。在一些實施例中，光源可以是脈衝雷射或脈衝發光二極體（light-emitting diode，LED）。在一些實施例中，來自光源的光也可以調制。在一些實施例中，光源產生紅外（infrared，IR）光。在一些實施例中，光源可掃描所測量的目標或場景。

【0044】 方法 600 繼續操作 604，其中根據一些實施例由光檢測單元接收至少一個反射光脈衝。在一些實施例中，光檢測單元包括單光子雪崩二極體（SPAD）。SPAD 200 包括光電二極體 202，所述光電二極體依賴於碰撞游離效應來倍增光生電子和電洞。在一些實施例中，光電二極體 202 可在矽晶片中或通過標準互補型金屬氧化物半導體（CMOS）製造製程來製作。在一些實施例中，光電二極體 202 可使用第 III 族到第 V 族半導體材料來製作。在一些實施例中，光檢測單元更包括相關聯的光學件，例如用以聚集光電二極體 202 的反射光的透鏡、用以降低雜訊的帶通濾波器。

【0045】 方法 600 繼續操作 606，其中根據一些實施例在第一檢測模式下確定第一距離。在一些實施例中，第一檢測模式為直接

飛行時間（DTOF）模式。在一些實施例中，數位控制單元 106 的第二元件 308 和計數器陣列 108 用於確定第一距離。在一些實施例中，第二元件 308 包括兩個相同的電路，其中兩個相同的電路各自包括 D-正反器（DFF）電路 312 和鎖存器 314。

【0046】 在一些實施例中，第二元件 308 配置成操作為信號邊緣檢測器。舉例來說，當在第一 DFF 電路 312-2 上接收到雷射起始光脈衝時，CLK 脈衝由第三鎖存器 314-2 阻擋，且第三鎖存器 314-3 的輸出端子從高切換到低（即終止計數器起始）；且當在第二 DFF 電路 312-2 上接收到輸入雪崩脈衝時，CLK 脈衝由第四鎖存器 314-4 阻擋，且第四鎖存器 314-4 的輸出端子從高切換到低（即終止計數器終止）。

【0047】 在所示出的實施例中，邏輯控制單元從第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 接收信號，以根據以下等式來確定當系統在 DTOF 模式下操作（即計數器從第二元件 308 接收信號）時的距離：

【0048】 $D_2 = \left(\frac{cT_{CLK}}{2}\right) \times (\textit{計數器 2} - \textit{計數器 1})$

【0049】 其中 D_2 是光源與反射入射光的目標之間的距離；c 是光速；T_{CLK} 是 CLK 脈衝的週期；且計數器 1 和計數器 2 是分別來自第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 的輸出。

【0050】 方法 600 繼續操作 608，其中確定(計數器 2-計數器 1)的值且將所述值與預定時間參考進行比較。在一些實施例中，當(計數器 2-計數器 1)的值大於 N（其中 N 是預定正整數）時，方

法 600 繼續操作 606 以允許系統繼續在 DTOF 模式下操作。在一些其它實施例中，當(計數器 2-計數器 1)的值小於 N 時，方法 600 繼續操作 602、604 且進一步繼續操作 610，其中根據一些實施例在第二操作模式下確定第二距離。在一些實施例中，第二模式為間接飛行時間（ITOF）模式。在一些實施例中，邏輯控制單元 110 禁用第二元件 308 的 CLK 輸入且啟用第一元件 306 的輸入脈衝，從而允許系統切換到 ITOF 模式。

【0051】 在一些實施例中，第一元件 306 配置成操作為邏輯多工器。舉例來說，在同相週期（例如同相脈衝在第一鎖存器 314-1 的端子 D 上較高且異相脈衝在第二鎖存器 314-2 的端子 D 上較低的週期）期間，來自行中的 SPAD 200 的輸入雪崩脈衝全部輸出到第一計數器 316-1 中。類似地，在異相週期（例如同相脈衝在第一鎖存器 314-1 的端子 D 上較低且異相脈衝在第二鎖存器 314-2 的端子 D 上較高的週期）期間，來自行中的 SPAD 200 的所有雪崩脈衝隨後輸出到第二計數器 316-2 中。在一些實施例中，第一元件 306 配置為“閘控時鐘鎖存器”以防止發生在同相時鐘與異相時鐘之間的邊緣處的干擾問題。在一些實施例中，第一元件 306 允許將兩相（即同相脈衝和異相脈衝）的邊緣處的輸入雪崩脈衝僅計數到第一計數器 316-1 中而不是計數兩次。

【0052】 在所示出的實施例中，邏輯控制單元從第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 接收信號，以根據以下等式來確定當系統在 ITOF 模式下操作（即計數器從第一元件 306 接收信號）時的

距離：

【0053】 $D_1 = \left(\frac{cT_{AP}}{2}\right) \times \frac{計數器\ 2}{計數器\ 1+計數器\ 2}$

【0054】 其中 D_1 是光源與反射入射光的目標之間的距離；c 是光速；T_{AP} 是同相脈衝或異相脈衝的脈衝寬度；且計數器 1 和計數器 2 是分別來自第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 的輸出。

【0055】 在一些實施例中，多次測量第一距離和第二距離，且可使用長條圖以統計方式確定實際距離。

【0056】 圖 7 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系統 700 的示例性電路圖。在一些實施例中，TOF 感測系統 700 包括邏輯控制單元 106 的子單元 702 和計數器陣列 108 的計數器單元 704。在一些實施例中，TOF 感測電路 700 耦合到 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行以用於接收雪崩脈衝，且進一步耦合到邏輯控制單元 110 以用於確定距離。

【0057】 在一些實施例中，邏輯控制單元的子單元 702 包括第一數位開關 706、第二數位開關 708、第三數位開關 710 以及第四數位開關 712。第一數位開關 706 包括第一 DFF 電路 312-1 和第一鎖存器 314-1；第二數位開關 708 包括第二 DFF 電路 312-2 和第二鎖存器 314-2；第三數位開關 710 包括第三 DFF 電路 312-3、第四 DFF 電路 312-4 以及第三鎖存器 314-3；且第四數位開關 712 包括第五 DFF 電路 312-5、第六 DFF 電路 312-6、第七 DFF 電路 312-7 以及第四鎖存器 314-4。

【0058】 在所示出的實施例中，第一 DFF 電路 312-1 的端子 D 固

定成邏輯“高”信號；第一 DFF 電路 312-1 的端子 C 接收輸入脈衝信號（即雷射起始光脈衝）；且第一 DFF 電路 312-1 的端子反相 Q 耦合到第一鎖存器 314-1 的端子 E。在所示出的實施例中，第一鎖存器 314-1 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第一鎖存器 314-1 的端子 Q 最終耦合到第一計數器 316-1。

【0059】 在一些實施例中，計數器單元 704 包括四個計數器 316，包含第一計數器 316-1、第二計數器 316-2、第三計數器 316-3 以及第四計數器 316-4。在一些實施例中，第一計數器 316-1、第二計數器 316-2、第三計數器 316-3 以及第四計數器 316-4 分別耦合到第一數位開關 706、第二數位開關 708、第三數位開關 710 以及第四數位開關 712。

【0060】 類似地，第二 DFF 電路 312-2 的端子 D 固定成邏輯“高”信號；第二 DFF 電路 312-2 的端子 C 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第二 DFF 電路 312-2 的端子反相 Q 耦合到第二鎖存器 314-2 的端子 E。在所示出的實施例中，第二鎖存器 314-2 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第二鎖存器 314-2 的端子 Q 最終耦合到第二計數器 316-2。

【0061】 類似地，第三 DFF 電路 312-3 的端子 D 固定成邏輯“高”信號；第三 DFF 電路 312-3 的端子 C 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第三 DFF

電路 312-3 的端子 Q 耦合到第四 DFF 電路 312-4 的端子 D。第四 DFF 電路 312-4 的端子反相 Q 耦合到第三鎖存器 314-3 的端子 E。在所示出的實施例中，第三鎖存器 314-3 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第三鎖存器 314-3 的端子 Q 最終耦合到第三計數器 316-3。

【0062】 類似地，第五 DFF 電路 312-5 的端子 D 固定成邏輯“高”信號；第五 DFF 電路 312-5 的端子 C 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第五 DFF 電路 312-5 的端子 Q 耦合到第六 DFF 電路 312-6 的端子 D。第六 DFF 電路 312-6 的端子 Q 耦合到第七 DFF 電路 312-7 的端子 D。第七 DFF 電路 312-7 的端子反相 Q 耦合到第四鎖存器 314-4 的端子 E。在所示出的實施例中，第四鎖存器 314-4 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第四鎖存器 314-4 的端子 Q 最終耦合到第四計數器 316-4。

【0063】 在一些實施例中，數位元控制單元 702 配置成操作為信號邊緣檢測器。舉例來說，當在第一 DFF 電路 312-1 上接收到雷射起始光脈衝時，CLK 脈衝由第一鎖存器 314-1 阻擋，且第一鎖存器 314-1 的輸出端子從高切換到低（即終止計數器起始）；且當在第二 DFF 電路 312-2 上接收到輸入雪崩脈衝時，CLK 脈衝由第二鎖存器 314-2 阻擋，且第二鎖存器 314-2 的輸出端子從高切換到低（即終止計數器 2）；當在第三 DFF 電路 312-3 上接收到輸入雪崩脈衝時，在接收到兩個雪崩脈衝且第三鎖存器 314-3 的

輸出端子從高切換到低（終止計數器 3）時，CLK 脈衝由第三鎖存器 314-3 阻擋；且當在第五 DFF 電路 312-5 上接收到輸入雪崩脈衝時，在接收到三個雪崩脈衝且第四鎖存器 314-4 的輸出端子從高切換到低（終止計數器 4）時，CLK 脈衝由第四鎖存器 314-3 阻擋。

【0064】 在所示出的實施例中，數位控制單元 706 允許系統在 DTOF 模式下操作。在一些實施例中，TDC 電路 700 允許基於時間差（即計數器 2 與計數器 1、計數器 3 與計數器 1 以及計數器 4 與計數器 1）來確定三個距離值。在一些實施例中，可使用以下等式來確定第一距離、第二距離以及第三距離，

【0065】 $D_1 = \left(\frac{cT_{CLK}}{2}\right) \times (\textit{計數器 2} - \textit{計數器 1})$

【0066】 $D_2 = \left(\frac{cT_{CLK}}{2}\right) \times (\textit{計數器 3} - \textit{計數器 1})$

【0067】 $D_3 = \left(\frac{cT_{CLK}}{2}\right) \times (\textit{計數器 4} - \textit{計數器 1})$

【0068】 其中 D1、D_2 以及 D3 是光源與反射入射光的目標之間的距離；c 是光速；T_{CLK} 是 CLK 脈衝的脈衝寬度；且計數器 1、計數器 2、計數器 3 以及計數器 4 是分別來自第一計數器 316-1、第二計數器 316-2、第三計數器 316-3 以及第四計數器 316-4 的輸出。此配置通過在 DTOF 模式下檢測多個雪崩脈衝而提供以統計方式對距離的有效確定。

【0069】 圖 8 是根據本公開的一些實施例的飛行時間（TOF）感測系統 800 的示例性電路圖。在一些實施例中，TOF 感測系統 800 包括邏輯控制單元 110 的子單元 802 和計數器陣列 108 的計

數器單元 704。在一些實施例中，TOF 感測系統 800 更包括 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行以用於接收雪崩脈衝，且進一步耦合到邏輯控制單元 110 以用於確定距離。

【0070】 在一些實施例中，邏輯控制單元 110 的子單元 802 包括兩個元件：第一元件 806 和第二元件 808。第一元件 806 包括第一數位開關 810、第二數位開關 812、第三數位開關 814 以及第四數位開關 816。四個數位開關 810/812/814/816 中的每一個包括反相器 310、鎖存器 314 以及與閘 318。在所示出的實施例中，第一元件 806 中的第一鎖存器 314-5 的端子 D 接收輸入脈衝信號（即 0 度相位脈衝）；第一元件 806 中的第一鎖存器 314-5 的端子 E 通過第一反相器 310-1 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第一元件 806 中的第一鎖存器 314-5 的端子 Q 和來自 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行的輸入脈衝信號進一步耦合到第一與閘 318-1。在所示出的實施例中，第一與閘 318-1 的輸出端子進一步耦合到第一計數器 316-1。

【0071】 類似地，第一元件 806 中的第二鎖存器 314-6 的端子 D 接收輸入脈衝信號（即 90 度相位脈衝）；第一元件 806 中的第二鎖存器 314-6 的端子 E 通過第二反相器 310-2 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第一元件 806 中的第二鎖存器 314-6 的端子 Q 和來自 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行的輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）進一步耦合到

第二與閘 318-2。在所示出的實施例中，第二與閘 318-2 的輸出端子進一步耦合到第二計數器 316-2。

【0072】 類似地，第一元件 806 中的第三鎖存器 314-7 的端子 D 接收輸入脈衝信號（即 180 度相位脈衝）；第一元件 806 中的第三鎖存器 314-7 的端子 E 通過第三反相器 310-3 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第一元件 806 中的第三鎖存器 314-7 的端子 Q 和來自 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行的輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）進一步耦合到第三與閘 318-3。在所示出的實施例中，第三與閘 318-3 的輸出端子進一步耦合到第三計數器 316-3。

【0073】 類似地，第一元件 806 中的第四鎖存器 314-8 的端子 D 接收輸入脈衝信號（即 270 度相位脈衝）；第一元件 806 中的第四鎖存器 314-8 的端子 E 通過第四反相器 310-4 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第一元件 806 中的第四鎖存器 314-8 的端子 Q 和來自 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行的輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）進一步耦合到第四與閘 318-4。在所示出的實施例中，第四與閘 318-4 的輸出端子進一步耦合到第四計數器 316-4。

【0074】 在一些實施例中，第一元件 806 配置成操作為邏輯多工器。舉例來說，在 0 度相位週期（例如 0 度相位脈衝在第一鎖存器 314-5 的端子 D 上較高且 90 度、180 度以及 270 度脈衝分別在第二鎖存器 314-6、第三鎖存器 314-7 以及第四鎖存器 314-8 的端

子 D 上較低的週期）期間，來自行中的 SPAD 200 的輸入雪崩脈衝全部輸出到第一計數器 316-1 中。類似地，在 90 度相位週期（例如 0 度相位、180 度相位以及 270 度相位脈衝在第一鎖存器 314-5、第三鎖存器 314-7 以及第四鎖存器 314-8 的端子 D 上較低且 90 度相位脈衝在第二鎖存器 314-6 的端子 D 上較高的週期）期間，來自行中的 SPAD 200 的所有雪崩脈衝隨後輸出到第二計數器 316-2 中。類似地，在 180 度相位週期（例如 0 度相位、90 度相位以及 270 度相位脈衝在第一鎖存器 314-5、第二鎖存器 314-6 以及第四鎖存器 314-8 的端子 D 上較低且 180 度相位脈衝在第三鎖存器 314-7 的端子 D 上較高的週期）期間，來自行中的 SPAD 200 的所有雪崩脈衝隨後輸出到第三計數器 316-3 中。類似地，在 270 度相位週期（例如 0 度相位、90 度相位以及 180 度相位脈衝在第一鎖存器 314-5、第二鎖存器 314-6 以及第三鎖存器 314-7 的端子 D 上較低且 270 度相位脈衝在第四鎖存器 314-8 的端子 D 上較高的週期）期間，來自行中的 SPAD 200 的所有雪崩脈衝隨後輸出到第四計數器 316-8 中。在一些實施例中，第一元件 806 配置為“閘控時鐘鎖存器”以防止發生在兩個相鄰相位脈衝之間的邊緣處的干擾問題。在一些實施例中，第一元件 806 允許將兩個相鄰相位（即 0 度脈衝和 90 度脈衝、90 度脈衝和 180 度脈衝、180 度脈衝和 270 度脈衝以及 270 度脈衝和 0 度脈衝）的邊緣處的輸入雪崩脈衝僅計數到計數器中一次而不是計數兩次。

【0075】 在所示出的實施例中，邏輯控制單元從第一計數器 316-1、第二計數器 316-2、第三計數器 316-3 以及第四計數器 316-4 接收信號，以根據以下等式來確定當系統在 ITOF 模式下操作（即計數器從第一元件 806 接收信號）時的距離：

【0076】 $D_1 = \left(\frac{cT_{AP}}{2}\right) \times \frac{1}{2\pi} \times \tan^{-1}\left(\frac{計數器\ 4 - 計數器\ 2}{計數器\ 1 - 計數器\ 3}\right)$

【0077】 其中 D_1 是光源與反射入射光的目標之間的距離；c 是光速；T_{AP} 是同相脈衝或異相脈衝的脈衝寬度；且計數器 1 和計數器 2 是分別來自第一計數器 316-1 和第二計數器 316-2 的輸出。

【0078】 第二元件 808 包括第一邊緣檢測器 706、第二邊緣檢測器 708、第三邊緣檢測器 710 以及第四邊緣檢測器 712。第一邊緣檢測器 706 包括第一 DFF 電路 312-1 和第一鎖存器 314-1；第二邊緣檢測器 708 包括第二 DFF 電路 312-2 和第二鎖存器 314-2；第三邊緣檢測器 710 包括第三 DFF 電路 312-3、第四 DFF 電路 312-4 以及第三鎖存器 314-3；且第四邊緣檢測器 712 包括第五 DFF 電路 312-5、第六 DFF 電路 312-6、第七 DFF 電路 312-7 以及第四鎖存器 314-4。

【0079】 在所示出的實施例中，第一 DFF 電路 312-1 的端子 D 固定成邏輯“高”信號；第一 DFF 電路 312-1 的端子 C 接收輸入脈衝信號（即雷射起始光脈衝）；且第一 DFF 電路 312-1 的端子反相 Q 耦合到第一鎖存器 314-1 的端子 E。在所示出的實施例中，第一鎖存器 314-1 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第一鎖存器 314-1 的端子 Q 最終耦合到第一計數

器 316-1。

【0080】 在一些實施例中，計數器單元 704 包括四個計數器 316，包含第一計數器 316-1、第二計數器 316-2、第三計數器 316-3 以及第四計數器 316-4。在一些實施例中，第一計數器 316-1、第二計數器 316-2、第三計數器 316-3 以及第四計數器 316-4 分別耦合到第一邊緣檢測器 706、第二邊緣檢測器 708、第三邊緣檢測器 710 以及第四邊緣檢測器 712。

【0081】 類似地，第二 DFF 電路 312-2 的端子 D 固定成邏輯“高”信號；第二 DFF 電路 312-2 的端子 C 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第二 DFF 電路 312-2 的端子反相 Q 耦合到第二鎖存器 314-2 的端子 E。在所示出的實施例中，第二鎖存器 314-2 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第二鎖存器 314-2 的端子 Q 最終耦合到第二計數器 316-2。

【0082】 類似地，第三 DFF 電路 312-3 的端子 D 固定成邏輯“高”信號；第三 DFF 電路 312-3 的端子 C 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第三 DFF 電路 312-3 的端子 Q 耦合到第四 DFF 電路 312-4 的端子 D。第四 DFF 電路 312-4 的端子反相 Q 耦合到第三鎖存器 314-3 的端子 E。在所示出的實施例中，第三鎖存器 314-3 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第三鎖存器 314-3 的端子 Q 最終耦合到第三計數器 316-3。

【0083】 類似地，第五 DFF 電路 312-5 的端子 D 固定成邏輯“高”信號；第五 DFF 電路 312-5 的端子 C 從 SPAD 陣列 102 中的 SPAD 200 的行接收輸入脈衝信號（即雪崩脈衝）；且第五 DFF 電路 312-5 的端子 Q 耦合到第六 DFF 電路 312-6 的端子 D。第六 DFF 電路 312-6 的端子 Q 耦合到第七 DFF 電路 312-7 的端子 D。第七 DFF 電路 312-7 的端子 D 耦合到第四鎖存器 314-4 的端子 E。在所示出的實施例中，第四鎖存器 314-4 的端子 D 從全域 PLL 單元 112 接收時鐘信號（即 CLK）；且第四鎖存器 314-4 的端子 Q 最終耦合到第四計數器 316-4。

【0084】 在一些實施例中，數位元控制單元 702 配置成操作為信號邊緣檢測器。舉例來說，當在第一 DFF 電路 312-1 上接收到雷射起始光脈衝時，CLK 脈衝由第一鎖存器 314-1 阻擋，且第一鎖存器 314-1 的輸出端子從高切換到低（即終止計數器起始）；且當在第二 DFF 電路 312-2 上接收到輸入雪崩脈衝時，CLK 脈衝由第二鎖存器 314-2 阻擋，且第二鎖存器 314-2 的輸出端子從高切換到低（即終止計數器 2）；當在第三 DFF 電路 312-3 上接收到輸入雪崩脈衝時，在接收到兩個雪崩脈衝且第三鎖存器 314-3 的輸出端子從高切換到低（終止計數器 3）時，CLK 脈衝由第三鎖存器 314-3 阻擋；且當在第五 DFF 電路 312-5 上接收到輸入雪崩脈衝時，在接收到三個雪崩脈衝且第四鎖存器 314-4 的輸出端子從高切換到低（終止計數器 4）時，CLK 脈衝由第四鎖存器 314-3 阻擋。

【0085】 在所示出的實施例中，數位控制單元 706 允許系統在 DTOF 模式下操作。在一些實施例中，TDC 電路 700 允許基於時間差（即計數器 2 與計數器 1、計數器 3 與計數器 1 以及計數器 4 與計數器 1）來確定三個距離值。在一些實施例中，可使用以下等式來確定第一距離、第二距離以及第三距離，

【0086】 $D_{2_1} = \left(\frac{cT_{CLK}}{2}\right) \times (\textit{計數器 2} - \textit{計數器 1})$

【0087】 $D_{2_2} = \left(\frac{cT_{CLK}}{2}\right) \times (\textit{計數器 3} - \textit{計數器 1})$

【0088】 $D_{2_3} = \left(\frac{cT_{CLK}}{2}\right) \times (\textit{計數器 4} - \textit{計數器 1})$

【0089】 其中 D_{2_1}、D_{2_2} 以及 D_{2_3} 是光源與反射入射光的目標之間的距離；c 是光速；T_{CLK} 是 CLK 脈衝的脈衝寬度；且計數器 1、計數器 2、計數器 3 以及計數器 4 是分別來自第一計數器 316-1、第二計數器 316-2、第三計數器 316-3 以及第四計數器 316-4 的輸出。此配置通過在 DTOF 模式下檢測多個雪崩脈衝而提供以統計方式對距離的有效確定。

【0090】 在一個實施例中，一種用於飛行時間（TOF）感測的系統，包括：檢測器陣列，包括多個單光子雪崩檢測器（SPAD）；以及控制電路，包括耦合到檢測器陣列的至少兩個數位控制陣列、耦合到至少兩個數位控制陣列的計數器陣列以及耦合到計數器陣列和至少兩個數位控制陣列的邏輯控制單元，其中檢測器陣列配置成從目標接收至少一個反射光脈衝，其中控制電路的第一數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元配置成從多個 SPAD 中的每一個接收至少一個雪崩脈衝以在第一 TOF 模式下確

定檢測器陣列與目標之間的第一距離，且其中控制電路的第二數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元配置成從多個 SPAD 中的每一個接收至少一個雪崩脈衝以在第二 TOF 模式下確定檢測器陣列與目標之間的第二距離。

【0091】 根據本發明的一些實施例，其中所述邏輯控制單元進一步配置成將時間與預定數量進行比較，其中回應於大於所述預定數量的所述時間的值，所述邏輯控制單元配置成啟用所述第二數位控制單元的輸入且禁用所述第一數位控制單元的輸入以從所述第一飛行時間模式切換到所述第二飛行時間模式，其中將所述時間確定為所述計數器陣列中的第一計數器與第二計數器之間的時間差。

【0092】 根據本發明的一些實施例，其中所述預定數量為參考時間。

【0093】 根據本發明的一些實施例，其中所述第一數位控制陣列包括至少兩個數位開關。

【0094】 根據本發明的一些實施例，其中所述至少兩個數位開關中的每一個包括反相器、鎖存器以及與閘。

【0095】 根據本發明的一些實施例，其中所述第二數位控制陣列包括至少兩個邊緣檢測器。

【0096】 根據本發明的一些實施例，其中所述第一飛行時間模式為直接飛行時間模式，且所述第二飛行時間模式為間接飛行時間模式。

【0097】 根據本發明的一些實施例，其中所述計數器陣列包括至少兩個計數器，且其中所述至少兩個計數器中的每一個包括多個D-正反器電路。

【0098】 根據本發明的一些實施例，其中所述至少一個反射光脈衝從光源發射，其中所述光源配置成向所述目標發射至少一個光脈衝以產生所述至少一個反射光脈衝。

【0099】 在另一實施例中，一種用於飛行時間（TOF）感測的方法，包括：由檢測器陣列從目標接收至少一個反射光脈衝；從檢測器陣列中的多個單光子雪崩檢測器中的每一個產生至少一個雪崩脈衝；在第一 TOF 模式下確定第一距離；將時間與預定參考時間進行比較；回應於大於預定參考時間的時間，從第一 TOF 模式切換到第二 TOF 模式；以及在第二 TOF 模式下確定第二距離，其中檢測器陣列配置成從目標接收至少一個反射光脈衝，其中確定第一距離由控制電路的第一數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元執行，且其中確定第二距離由控制電路的第二數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元執行。

【0100】 根據本發明的一些實施例，所述第一數位控制陣列包括至少兩個數位開關。

【0101】 根據本發明的一些實施例，其中所述至少兩個數位開關中的每一個包括反相器、鎖存器以及與閘。

【0102】 根據本發明的一些實施例，其中所述第二數位控制陣列包括至少兩個邊緣檢測器。

【0103】 根據本發明的一些實施例，其中所述第一飛行時間模式為直接飛行時間模式，且所述第二飛行時間模式為間接飛行時間模式。

【0104】 根據本發明的一些實施例，其中所述計數器陣列包括至少兩個計數器，且其中所述至少兩個計數器中的每一個包括多個D-正反器電路。

【0105】 然而，在另一實施例中，一種用於飛行時間（TOF）感測的系統，包括：光源，配置成向目標發射至少一個光脈衝；檢測器陣列，包括多個單光子雪崩檢測器（SPAD），其中檢測器配置成從目標接收至少一個反射光脈衝；第一數位控制陣列，包括N個對應邊緣檢測器；計數器陣列，包括耦合到第一數位控制陣列的N個對應邊緣檢測器的N個計數器；邏輯控制單元，耦合到配置成在第一 TOF 模式下確定第一距離的計數器陣列，其中 N 是正整數，且 N 等於或大於 4。

【0106】 根據本發明的一些實施例，其中所述 N 個計數器中的每一個包括多個 D-正反器電路。

【0107】 根據本發明的一些實施例，所述的用於飛行時間感測的系統，更包括：第二數位控制陣列，包括 N 個數位開關，其中所述第二數位控制陣列耦合在所述檢測器陣列與所述邏輯控制單元之間，其中所述第二數位控制陣列用於在第二飛行時間模式下確定第二距離。

【0108】 根據本發明的一些實施例，其中所述第二數位控制陣列

的所述 N 個數位開關中的每一個包括反相器、鎖存器以及與閘。

【0109】 根據本發明的一些實施例，其中所述第一飛行時間模式為直接飛行時間模式。

【0110】 前文概述若干實施例的特徵以使本領域的普通技術人員可更好地理解本公開的各方面。本領域的技術人員應瞭解，其可易於將本公開用作設計或修改用於實施本文中所引入實施例的相同目的及/或實現相同優勢的其它製程和結構的基礎。本領域的技術人員還應認識到，這類等效構造並不脫離本公開的精神和範圍，且其可在不脫離本公開的精神和範圍的情況下在本文中做出各種改變、替代以及更改。

【符號說明】

【0111】

100、300、700、800：飛行時間感測系統

102：檢測器陣列

104：列控制單元

106：數位控制單元

108：計數器陣列單元

110：邏輯控制單元

112：全域鎖相迴路單元

200：單光子雪崩檢測器

202：光電二極體

204：電晶體

206：擊穿電壓

208：反相器

210、212：端子

302、702、802：子單元

304、704：計數器單元

306、806：第一元件

308、808：第二元件

310-1：第一反相器

310-2：第二反相器

310-3：第三反相器

310-4：第四反相器

312-1：第一 DFF 電路

312-2：第二 DFF 電路

312-3：第三 DFF 電路

312-4：第四 DFF 電路

312-5：第五 DFF 電路

312-6：第六 DFF 電路

312-7：第七 DFF 電路

314-1、314-5：第一鎖存器

314-2、314-6：第二鎖存器

314-3、314-7：第三鎖存器

314-4、314-8：第四鎖存器

316：計數器

316-1：第一計數器

316-2：第二計數器

316-3：第三計數器

316-4：第四計數器

318-1、318-2、318-3、318-4：與閘

320-1：第一 DFF 電路 FF0

320-2：第二 DFF 電路 FF1

320-3：第三 DFF 電路 FF2

320-4：第四 DFF 電路 FF3

400、500：波形

402：RSELI

404：第一 CLK 脈衝

406：雷射起始光脈衝

408：反射光脈衝

410、506：計數器 1

412、508：計數器 2

502：輸入脈衝 0

504：輸入脈衝 180

600：方法

602、604、606、608、610：操作

706、810：第一數位開關

708、812：第二數位開關

710、814：第三數位開關

712、816：第四數位開關

D1、D2、D3：距離

Q0、Q1、Q2、Q3：輸出

t0、t1、t2、t3、t4：時間

【發明申請專利範圍】

【第1項】 一種用於飛行時間（TOF）感測的系統，包括：

檢測器陣列，包括多個單光子雪崩檢測器（SPAD）；以及

控制電路，包括

至少兩個數位控制陣列，耦合到所述檢測器陣列，

計數器陣列，耦合到所述至少兩個數位控制陣列，以及

邏輯控制單元，耦合到所述計數器陣列及所述至少兩個數位控制陣列，

其中所述檢測器陣列配置成從目標接收至少一個反射光脈衝，其中所述控制電路的第一數位控制陣列、所述計數器陣列以及所述邏輯控制單元配置成從所述多個單光子雪崩檢測器中的每一個接收至少一個雪崩脈衝以在第一飛行時間模式下確定所述檢測器陣列與所述目標之間的第一距離，且其中所述控制電路的第二數位控制陣列、所述計數器陣列以及所述邏輯控制單元配置成從所述多個單光子雪崩檢測器中的所述每一個接收所述至少一個雪崩脈衝以在第二飛行時間模式下確定所述檢測器陣列與所述目標之間的第二距離。

【第2項】 如申請專利範圍第1項所述的用於飛行時間感測的系統，其中所述邏輯控制單元進一步配置成將時間與預定數量進行比較，

其中回應於大於所述預定數量的所述時間的值，所述邏輯控制單元配置成啟用所述第二數位控制單元的輸入且禁用所述第一數位控制單元的輸入以從所述第一飛行時間模式切換到所述第二

飛行時間模式，其中將所述時間確定為所述計數器陣列中的第一計數器與第二計數器之間的時間差。

【第3項】 如申請專利範圍第1項所述的用於飛行時間感測的系統，其中所述第二數位控制陣列包括至少兩個邊緣檢測器。

【第4項】 如申請專利範圍第1項所述的用於飛行時間感測的系統，其中所述計數器陣列包括至少兩個計數器，且其中所述至少兩個計數器中的每一個包括多個D-正反器電路。

【第5項】 一種用於飛行時間（TOF）感測的方法，包括：

由檢測器陣列從目標接收至少一個反射光脈衝；

從所述檢測器陣列中的多個單光子雪崩檢測器中的每一個產生至少一個雪崩脈衝；

在第一飛行時間模式下確定第一距離；

將時間與預定參考時間進行比較；

回應於大於所述預定參考時間的所述時間，從所述第一飛行時間模式切換到第二飛行時間模式；以及

在所述第二飛行時間模式下確定第二距離，

其中所述檢測器陣列配置成從所述目標接收所述至少一個反射光脈衝，其中所述確定第一距離由控制電路的第一數位控制陣列、計數器陣列以及邏輯控制單元執行，且其中所述確定第二距離由所述控制電路的第二數位控制陣列、所述計數器陣列以及所述邏輯控制單元執行。

【第6項】 如申請專利範圍第5項所述的用於飛行時間感測的方法，其中所述第二數位控制陣列包括至少兩個邊緣檢測器。

【第7項】 如申請專利範圍第5項所述的用於飛行時間感測的方法，其中所述計數器陣列包括至少兩個計數器，且其中所述至少兩個計數器中的每一個包括多個D-正反器電路。

【第8項】 一種用於飛行時間（TOF）感測的系統，包括：

光源，配置成向目標發射至少一個光脈衝；

檢測器陣列，包括多個單光子雪崩檢測器（SPAD），其中所述檢測器配置成從所述目標接收至少一個反射光脈衝；

第一數位控制陣列，包括N個對應邊緣檢測器；

計數器陣列，包括耦合到所述第一數位控制陣列的所述N個對應邊緣檢測器的N個計數器；

邏輯控制單元，耦合到配置成在第一飛行時間模式下確定第一距離的所述計數器陣列，

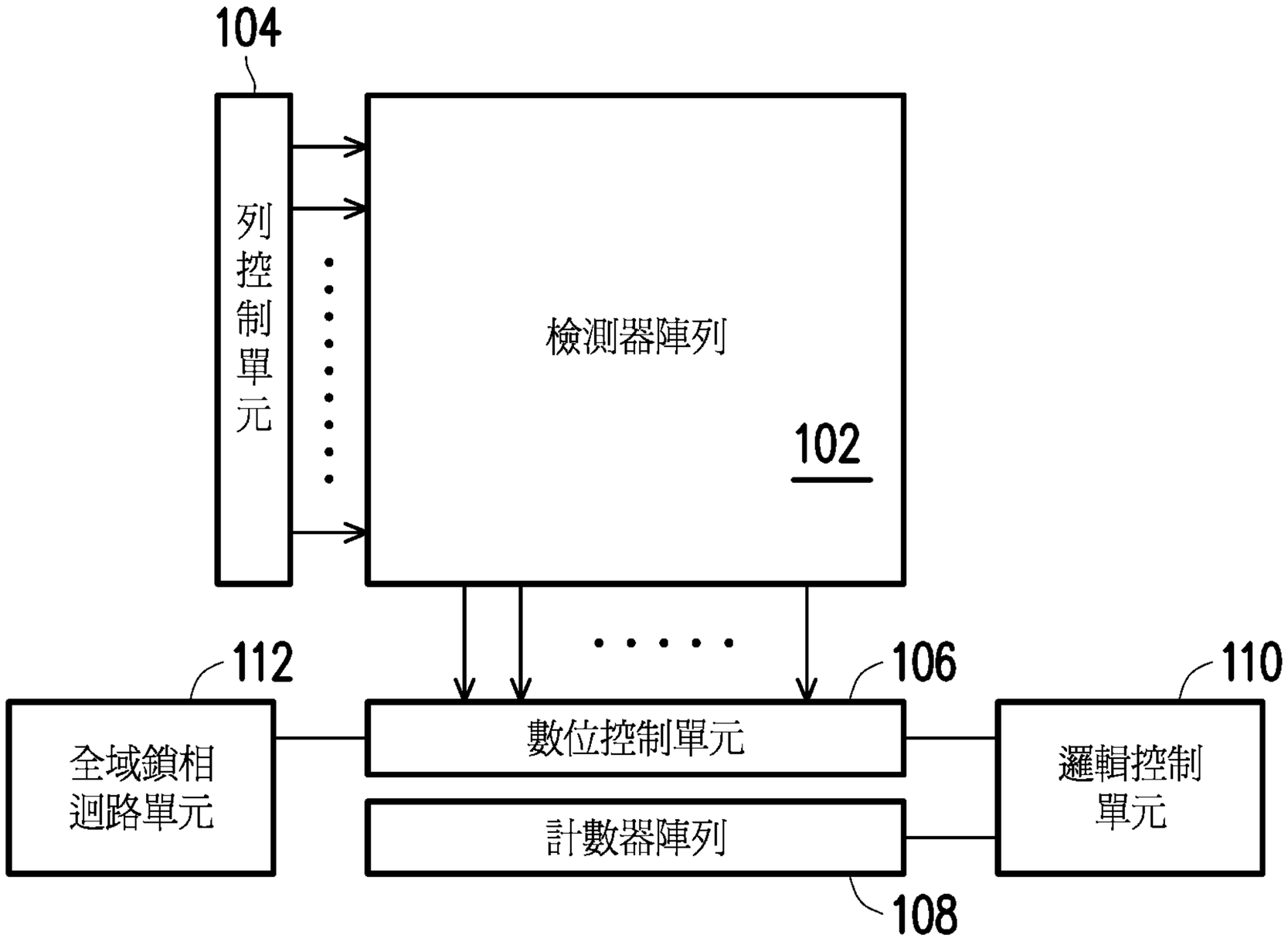
其中N是正整數，且N等於或大於4。

【第9項】 如申請專利範圍第8項所述的系統，其中所述N個計數器中的每一個包括多個D-正反器電路。

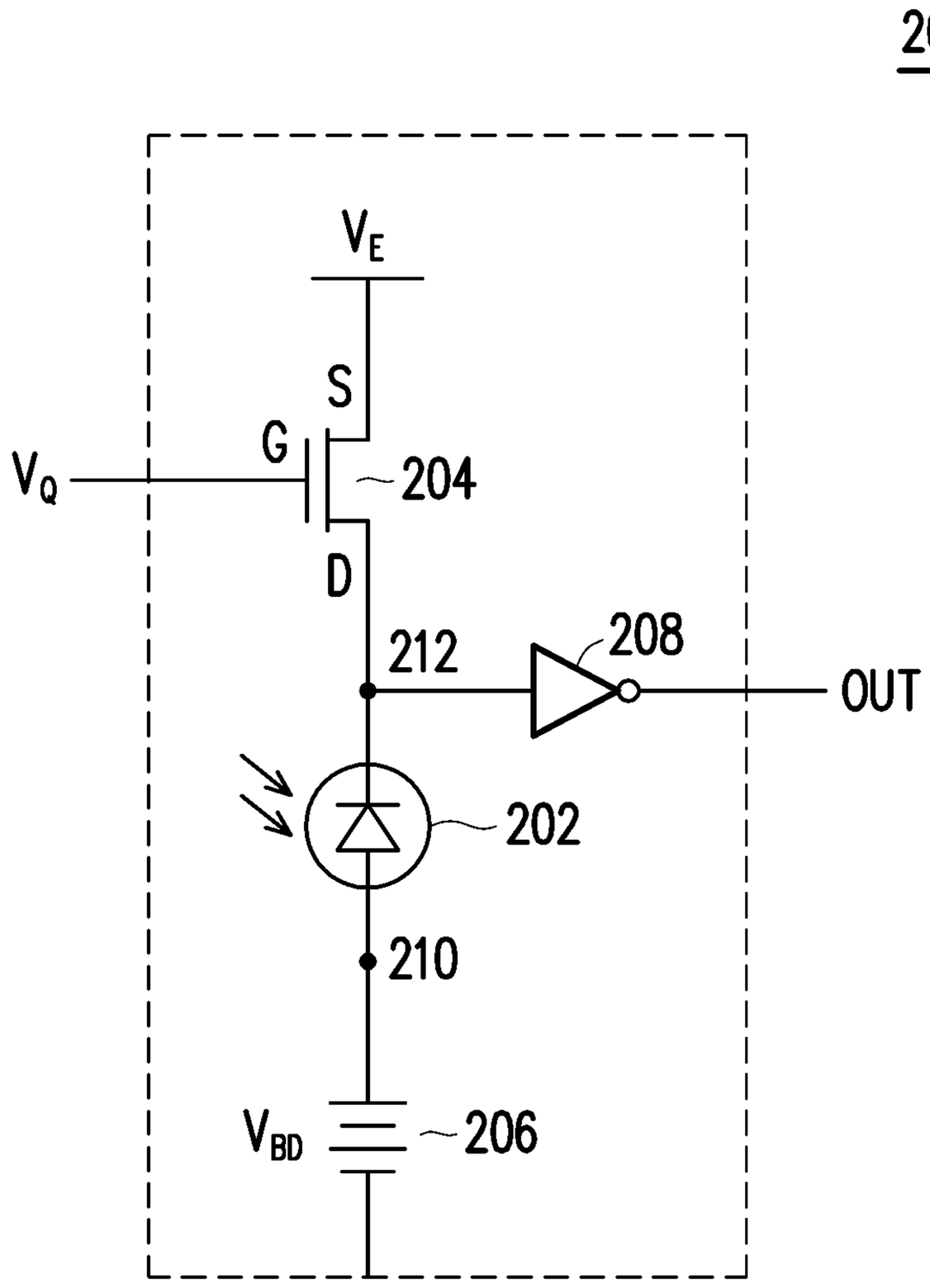
【第10項】 如申請專利範圍第8項所述的系統，更包括：

第二數位控制陣列，包括N個數位開關，其中所述第二數位控制陣列耦合在所述檢測器陣列與所述邏輯控制單元之間，其中所述第二數位控制陣列用於在第二飛行時間模式下確定第二距離。

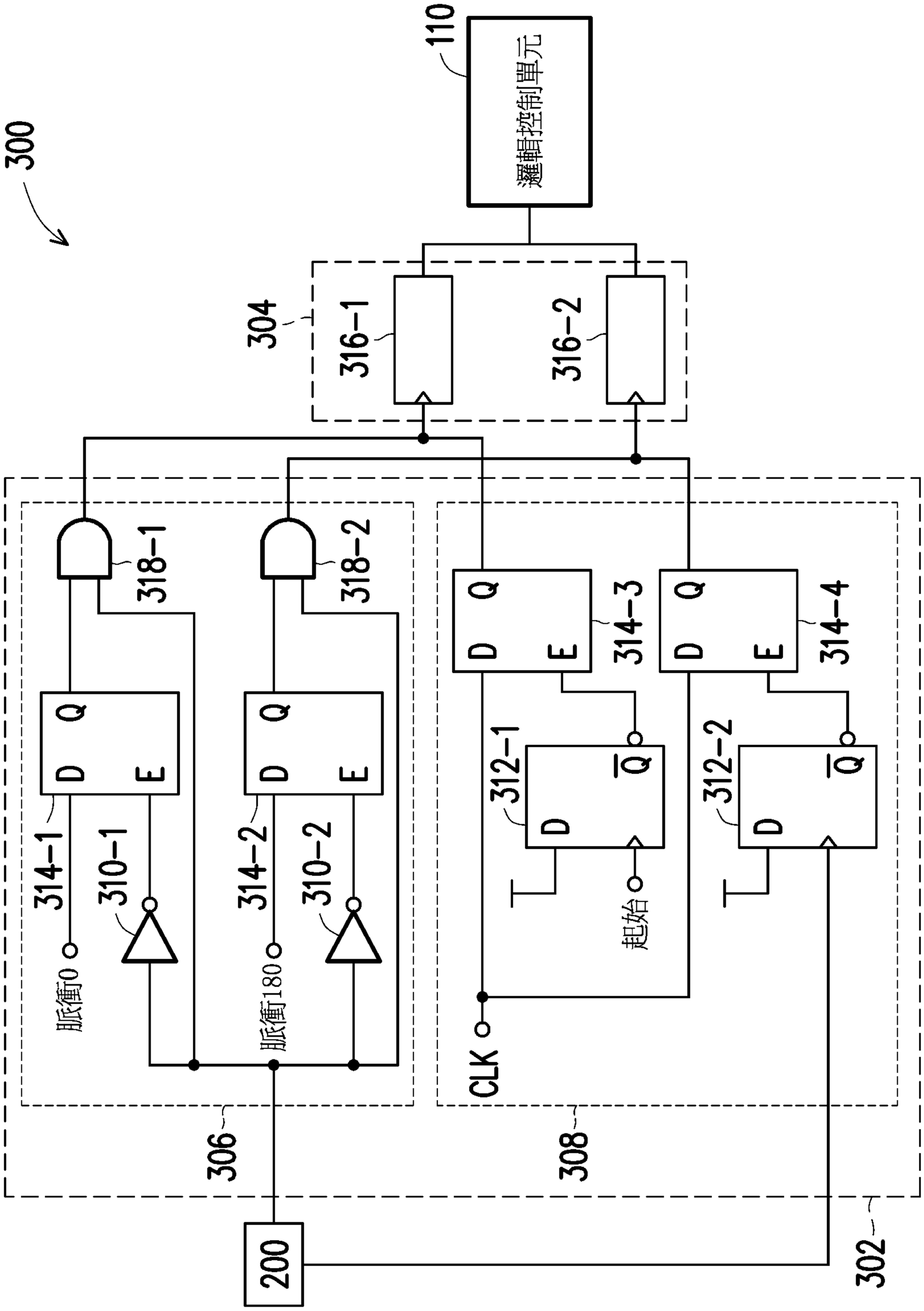
【發明圖式】


100
104
列控制單元
檢測器陣列
102
112
全域鎖相迴路單元
106
數位控制單元
計數器陣列
108
110
邏輯控制單元

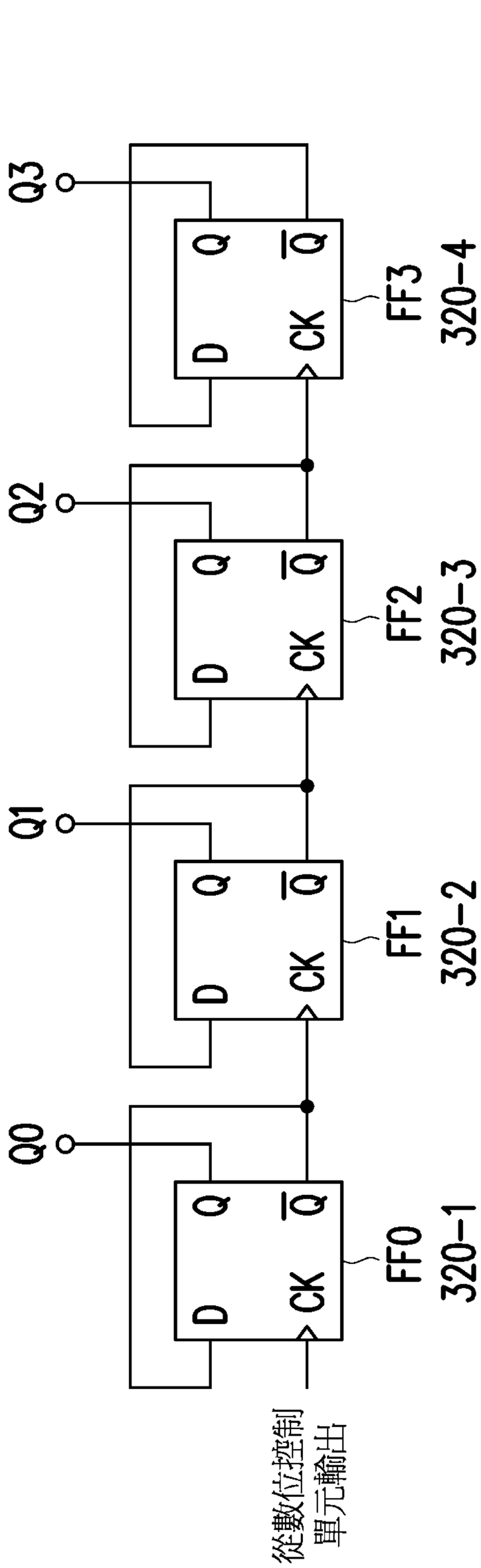
【圖1】



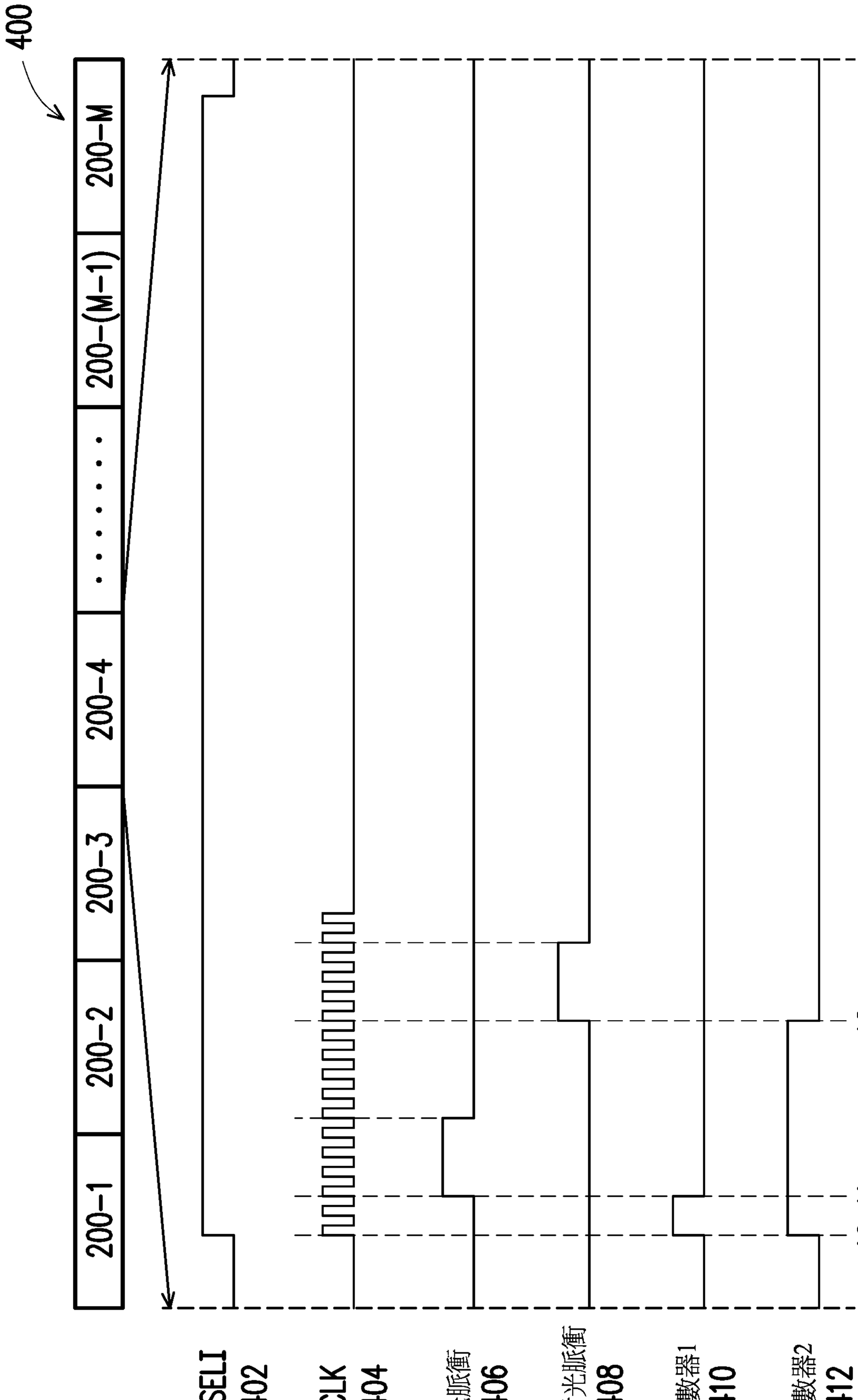
【圖2】


300
110
邏輯控制單元
304
316-1
316-2
318-1
318-2
D Q E
314-1
314-2
314-3
314-4
310-1
310-2
脈衝0
脈衝180
312-1
312-2
D Q
起始
CLK
306
308
200
302

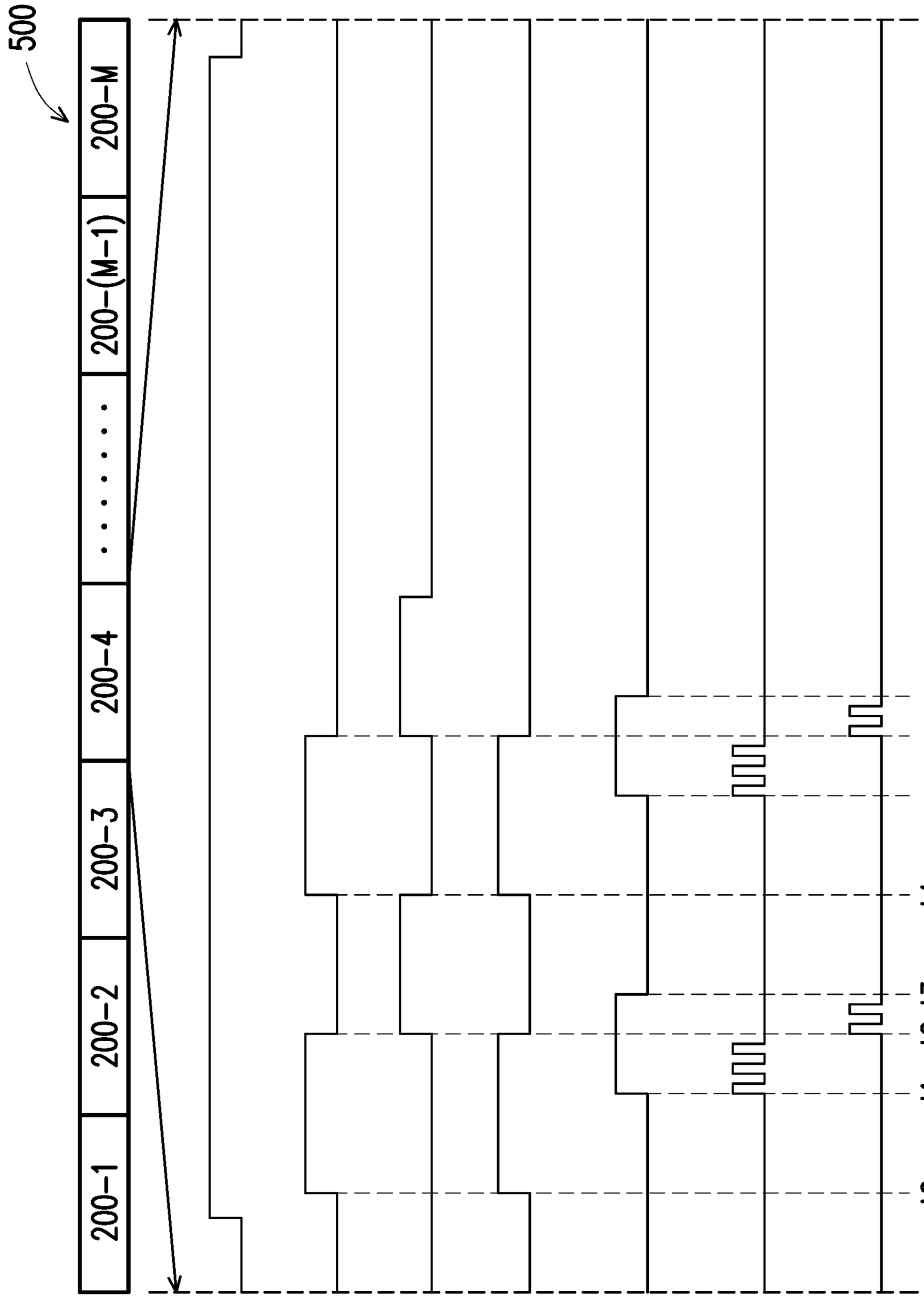
【圖3A】


316
Q3
Q2
Q1
Q0
Q
$\overline{Q}$
D
CK
FF3
320-4
FF2
320-3
FF1
320-2
FF0
320-1
從數位控制單元輸出

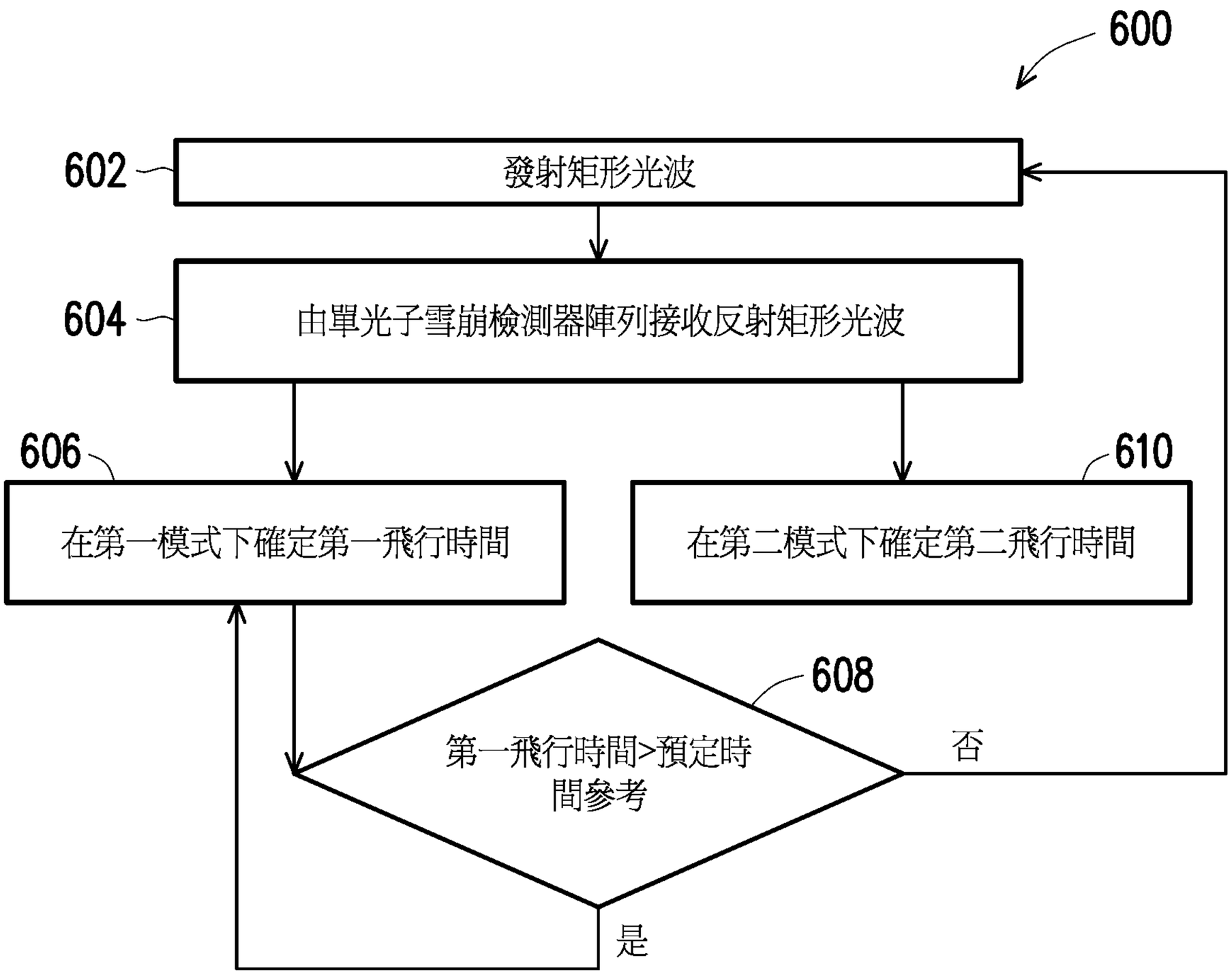
【圖3B】


400
200-M
200-(M-1)
200-4
200-3
200-2
200-1
RSELI
402
CLK
404
光脈衝
406
反射光脈衝
408
計數器1
410
計數器2
412
t0
t1
t2

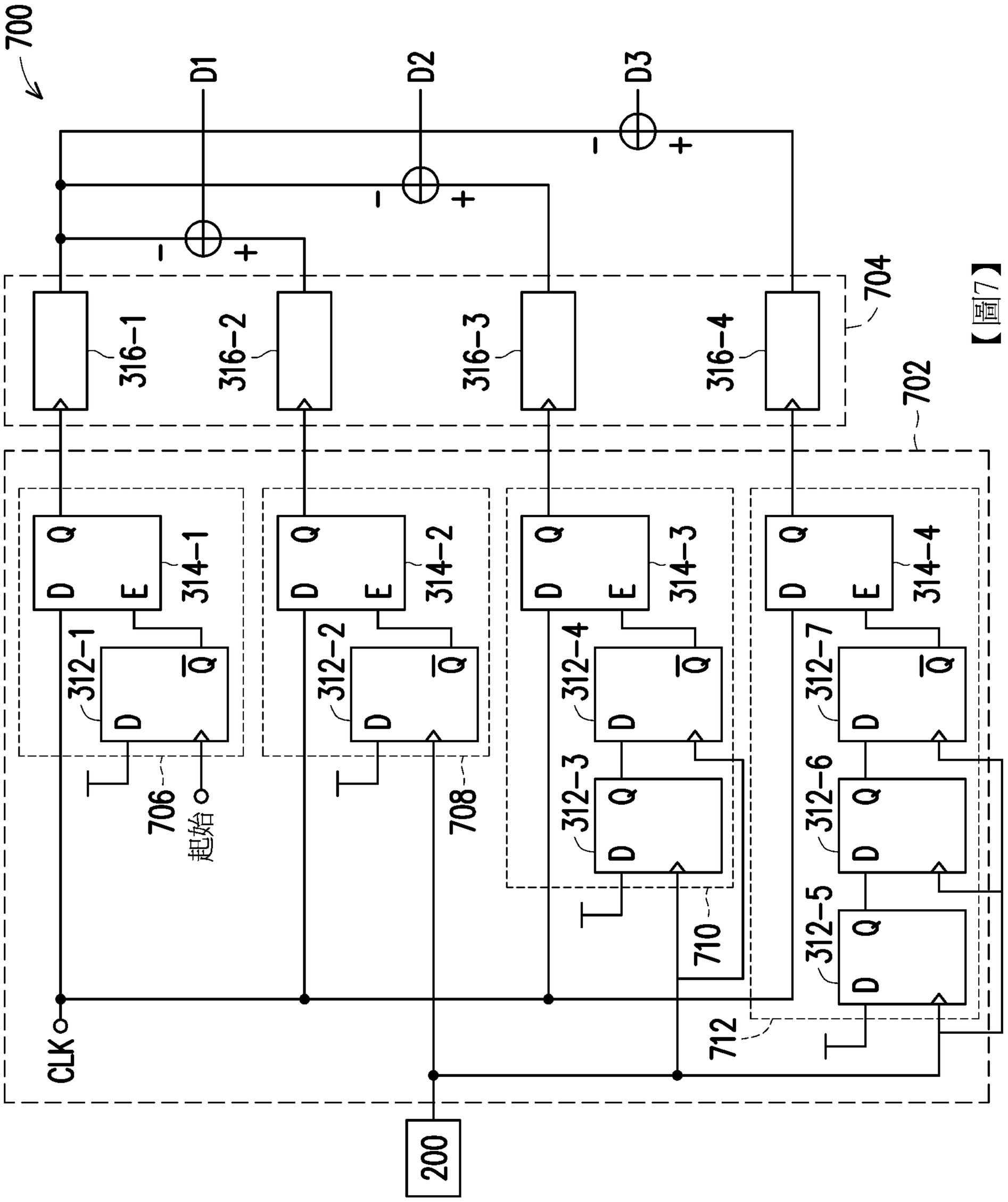
【圖4】


500
200-M
200-(M-1)
200-4
200-3
200-2
200-1
t0
t1
t2
t3
t4
RSELI
402
脈衝0
502
脈衝180
504
光脈衝406
406
反射光脈衝
408
計數器1
506
計數器2
508

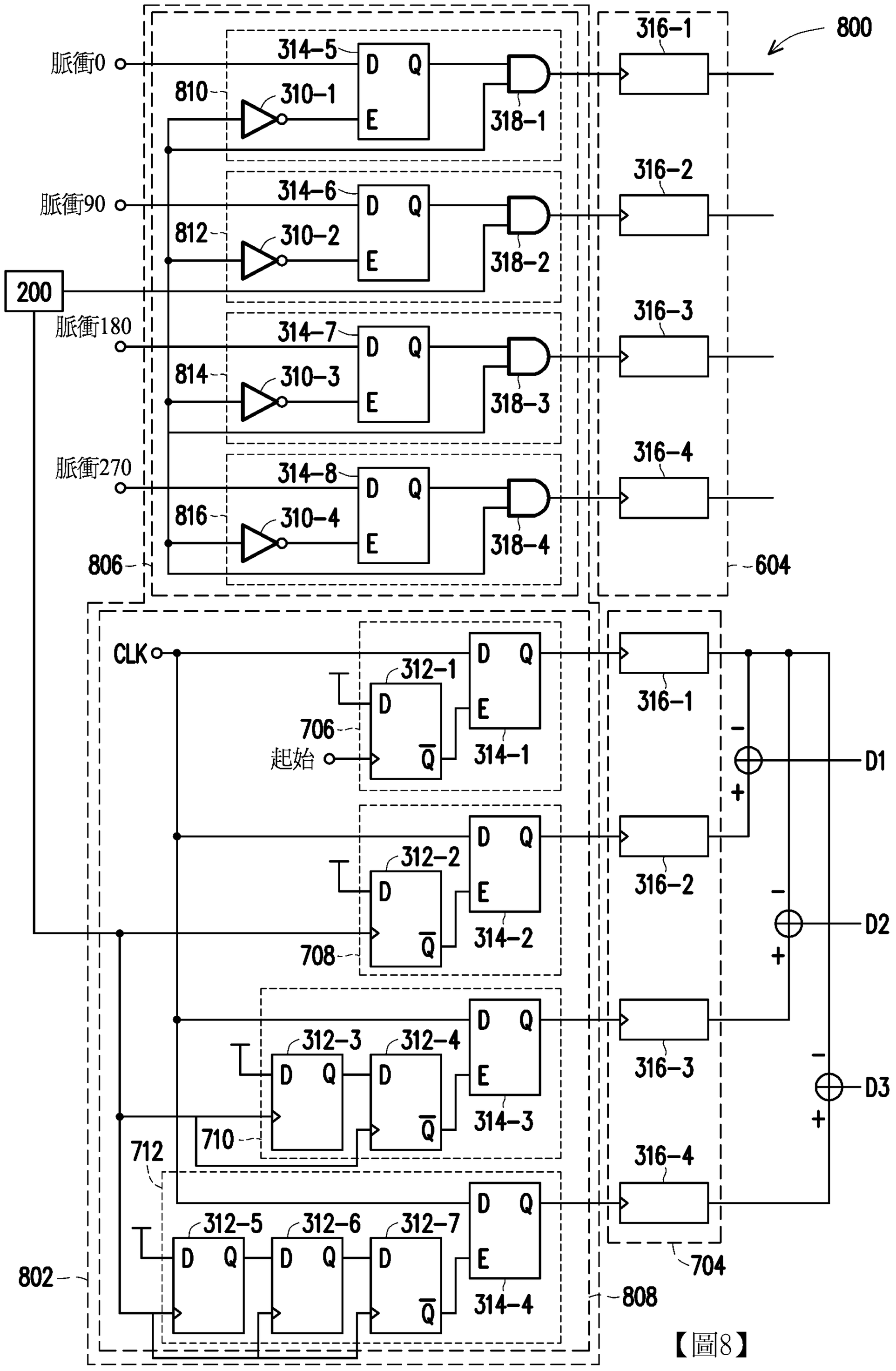
【圖5】


600
602
發射矩形光波
604
由單光子雪崩檢測器陣列接收反射矩形光波
606
在第一模式下確定第一飛行時間
610
在第二模式下確定第二飛行時間
608
第一飛行時間>預定時間參考
否
是

【圖6】


700
D1
D2
D3
-
+
316-1
316-2
316-3
316-4
704
702
Q
D
E
314-1
314-2
314-3
314-4
312-1
312-2
312-3
312-4
312-5
312-6
312-7
706
起始
708
710
712
CLK
200

【圖7】


800
316-1
脈衝0
314-5
D Q
E
810
310-1
318-1
316-2
脈衝90
314-6
812
310-2
318-2
200
316-3
脈衝180
314-7
814
310-3
318-3
316-4
脈衝270
314-8
816
310-4
318-4
806
604
CLK
312-1
706
起始
314-1
D1
312-2
708
314-2
D2
312-3
312-4
710
314-3
D3
712
312-5
312-6
312-7
314-4
802
808
704

【圖8】