

單光子偵測器原理與其光學雷達應用

Single-Photon Avalanche Diode and its Application on Light Detection and Ranging

林聖迪、蔡嘉明、黃煒勛、劉泰祥、吳岱融

Sheng-Di Lin, Chia-Ming Tsai, Wei-Syun Huang, Tai-Hsiang Liu, Dai-Rong Wu

低成本的 CMOS 單光子崩潰二極體在弱光偵測的優異元件性能，與其能與電路整合成單一晶片的特性，吸引了各種相關應用，從生醫檢測、物質檢定、光學測距、到量子通訊等的研究。本文從該元件的操作原理出發，並藉以說明該元件的各種性能參數，最後簡述其在車用光學雷達上的應用優勢與我們的初步研究成果。

Excellent device performance, easy integration with circuits, and low-cost CMOS single-photon avalanche diodes (SPADs) for weak light detection attract application studies on bio-medical monitoring, substance identification, optical ranging, and quantum communication. This paper begins with device operation principle to explain its performance parameters subsequently. Finally, the advantages of using SPADs for light detection and ranging in vehicles and our related results are presented.

一、前言

高敏感度的光偵測器在工業、醫療方面及日常生活中，都有非常多的應用需求，從機器人的光學感測、病房中即時血氧濃度監測到智慧型手機裡的距離感測裝置等，都需要高精確度與高可靠度的光偵測器；在光偵測器中，最重要的參數是能夠偵測到多低的光量，也就是對光的敏感度有多高，可以想見在此指標中，其終極目標是對單一光子的偵測能力，也是本文將要介紹的單光子偵測器所具備的性能。

其實，足以偵測極弱光的光偵測器種類繁多，包括傳統的光電倍增管 (photomultiplier tube, PMT)、電荷耦合元件 (charge coupled device, CCD)

與累崩式光電二極體 (avalanche photodiode, APD) 等，現今普遍存在各種應用情境之中，與這些元件相較，近一二十年快速發展的單光子崩潰二極體 (single-photon avalanche diode, SPAD)，由於能夠與 IC (integrated circuits) 產業的 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 製程整合，不論在學術界或產業界，都引起相關應用層面極大的關注⁽¹⁾。其中特別是車用光學雷達 (light detection and ranging, LiDAR)，一方面因為預期能夠大幅增進行車安全，降低車禍意外的發生率與死亡率，另一方面也被視為未來無人自動駕駛車的必要配備，具備極高的商業市場價值，所以特別受到矚目⁽²⁾，本文也會對此項應用作簡要的說明。

以下，在本文的第二節中，我們將先簡介單光

子崩潰二極體的運作原理，透過該原理來闡述其相關的元件性能參數。之後在第三節的光學雷達的應用中，我們會先介紹光學測距的方法與優點，再說明單光子崩潰二極體如何應用在光學雷達中，以及它所能帶來的優勢與利基所在。最後，在文章的第二節中，我們將就相關研究與應用作總結，並對未來的方向提出我們的看法。

二、單光子偵測器操作原理與元件參數

1. 元件操作原理

單光子崩潰二極體基本上由一個 P-N 二極體構成，雖然各種半導體材料都可以用來製作單光子崩潰二極體，但是截至目前為止，仍以矽所製作的單光子崩潰二極體特性最佳，也最具應用潛力。要了解單光子崩潰二極體的操作原理，必須從 PN 二極體的電壓電流特性曲線談起⁽³⁾，一個 PN 二極體在沒有光子入射時的電壓電流特性如圖 1 所示，其可依所施偏壓概分為四種操作模式，分別是正偏壓的太陽電池 (solar cell) 模式、負偏壓的光偵測器 (photodiode) 模式、累崩線性模式 (avalanche linear mode)、與崩潰電壓以上的蓋革模式 (Geiger mode)。其中在負偏壓的三種模式皆可用於偵測光子，其中的差別說明如下。

在光偵測器模式中，入射光子被半導體吸收後，產生電子電洞對 (electron-hole pair)，這些光子產生的載子，被元件內的電場驅動或經由擴散過

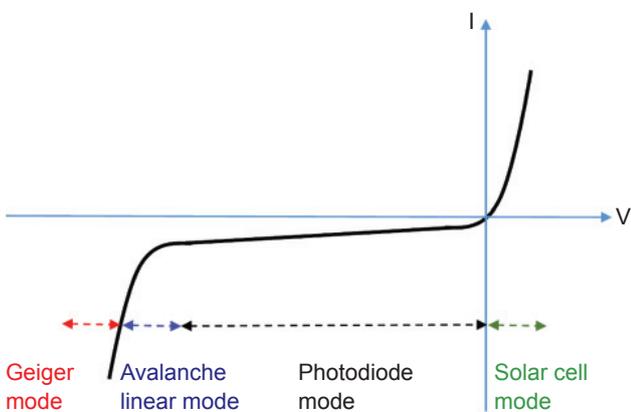


圖 1. PN 二極體的四種操作模式示意圖。

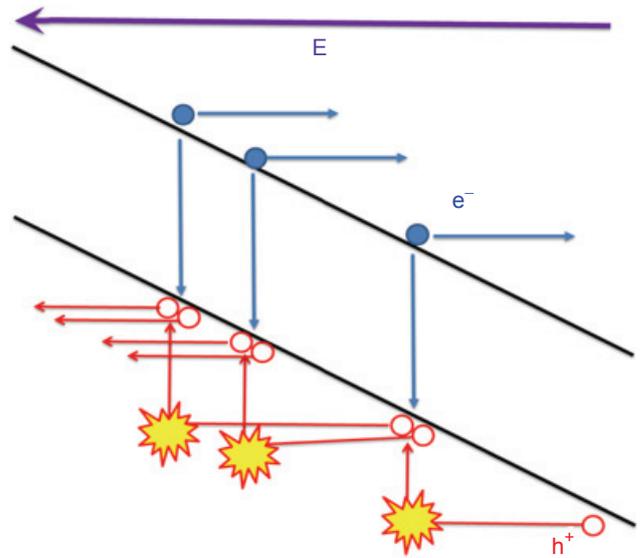


圖 2. 高電場下半導體內衝擊離子化過程示意圖，其中 E 代表電場， e^- 代表電子，而 h^+ 代表電洞。

程，到達電極成為電流訊號，經由外部電路或儀器讀取。在此過程中，元件吸收一個光子至多在電極端產生一個電子或電洞，也就是元件內部沒有任何增益 (gain)，如果入射光強度太弱，所產生的電流訊號低於元件雜訊，就會無法進行有效偵測；為了增進對弱光的偵測能力，可以將元件偏壓增加(加至更大的負偏壓) 至累崩線性模式，在此模式下元件通常稱作累崩光電二極體 (avalanche photodiode, APD)，由於元件內部在空乏區 (depletion region) 的電場極大 (約大於 10 kV/cm)，載子在電場加速下會產生衝擊離子化 (impact ionization) 現象，如圖 2 所示，也就是高能載子會將在價帶 (valance band) 的電子激發至導帶 (conduction band)，創造出新的電子電洞對，而這些新產生的載子也可能會被電場加速，再繼續創造出更多電子電洞對，也就是說，與光偵測器模式不同，在此模式中吸收一個光子後，透過衝擊離子化效應可以放大載子數目而收集到更多電流，也就是元件有內部增益，通常在此模式下，隨偏壓增加增益可高達 100 甚至 1000，也就是平均一個光子可以產生 100 到 1000 個電子電洞對，正因如此，累崩光偵測器可以用來偵測更弱的光，必須注意的是，在此模式下，雜訊也同時會被放大，因此適當選擇材料與偏壓條件是必要的。

當元件偏壓加到超過其崩潰電壓後，就會進入蓋革模式，也就是單光子崩潰二極體的操作範圍，而其大於崩潰電壓的量則稱作超額偏壓 (excess bias, V_{ex})。一般熟悉元件物理或稍有實作經驗的人，對於 PN 二極體操作在崩潰電壓之上，第一個反應會認為這是一個不合理的操作方式，因為元件在崩潰電壓之上就會因為過大電流而燒毀，如何用來偵測光子？事實上，這就是單光子崩潰二極體的奧妙之處。的確，在崩潰電壓之上，元件內部透過衝擊離子化過程將電流不斷放大，直到過大電流造成的焦耳熱 (Joule heat) 使元件溫度不斷上升而燒毀才停止；然而，在此物理過程中，有兩點值得注意，第一、衝擊離子化過程必須從某一顆初始載子 (initial carrier) 開始，如果沒有此初始載子，整個電流放大過程便無從發生，換言之，如果該初始載子是元件吸收一顆光子所產生的，該電流放大造成的崩潰事件便是偵測到該光子的證據；第二、崩潰事件中電流放大燒毀元件需要足夠大的電流，雖然在崩潰電壓之上可以有足夠大的電流燒毀元件，但是此電流放大過程需要時間，如果能在衝擊離子化過程中，當電流產生變大到外部電路可偵測 (通常在 μA 等級) 時，迅速將元件的電壓降回崩潰電壓之下，避免崩潰電流繼續增加，就可以避免元件被大電流燒毀。上述過程可以用如圖 3 的示意圖來說明，當元件操作在崩潰電壓之上時，事實上是處於所謂雙穩態 (bi-stable states)，當初始載子尚未出現引發後續崩潰時，元件中沒有崩潰電流而處於 OFF 狀態，而當初始載子 (可能是吸收光子產生，

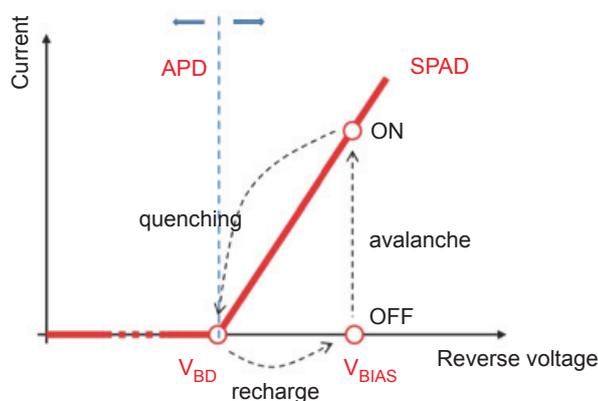


圖 3. 單光子崩潰二極體之蓋革模式示意圖。

也可能是元件內部自行產生) 出現且引發崩潰事件時，元件被觸發產生崩潰事件，而進入 ON 狀態，此時外部電路偵測到崩潰事件並迅速將元件偏壓降低至崩潰電壓以下，等到崩潰事件結束 (元件內部沒有崩潰電流) 後，在重新將元件偏壓增加到崩潰電壓之上，等待下一次崩潰事件發生。這樣的循環不斷進行，既可以用來偵測單一光子，又可以避免元件被過大電流燒毀。

2. 截止電路

由以上的說明可知，當單光子崩潰二極體操作在蓋革模式時，必須仰賴外部電路來將元件偏壓降至崩潰電壓以下，來使崩潰電流歸零，此外部電路稱作截止電路 (quenching circuit)，通常分成被動式與主動式兩種，此處我們僅就最簡單的被動式截止電路作介紹，如圖 4 所示，只要在元件上串接一個大電阻 R_L (約幾十到幾百 $k\Omega$)，就形成了被動截止電路，因為在元件尚未崩潰時 (即前述的 OFF 狀態)，電路上沒有崩潰電流流過，所以在 R_L 上的壓降為零，因此所有偏壓都在單光子崩潰二極體上，當崩潰事件被觸發開始建立崩潰電流後，隨著電流迅速增大，在大電阻 R_L 上的壓降也隨之增加，所以單光子崩潰二極體上的壓降迅速減少，直到元件上的跨壓低於崩潰電壓，元件/電路上的崩潰電流歸零為止，此時，電壓源會透過該大電阻重新對元件充電，使單光子崩潰二極體重新偏壓至崩潰電壓之上，等待下一次的光子偵測。必須一提的是，雖然被動截止電路簡單，但是由於重新對元件充電時必須經過該大電阻 R_L ，使得充電時間過長，不利於單光子崩潰二極體及時準備好偵測下一個光子。這段無法適當偵測光子的時間我們稱作元件的死亡時間 (dead time)，在被動截止電路中可長達數十 ns 到數個 μs ；過長的死亡時間對單光子崩潰二極體的某些應用會造成問題，例如我們之後會介紹的車用光學雷達，此時就必須引入主動電路來解決。

3. 單光子崩潰二極體元件參數

基於對單光子崩潰二極體操作原理的了解，我們接下來說明其相關的元件參數，單光子崩潰二極

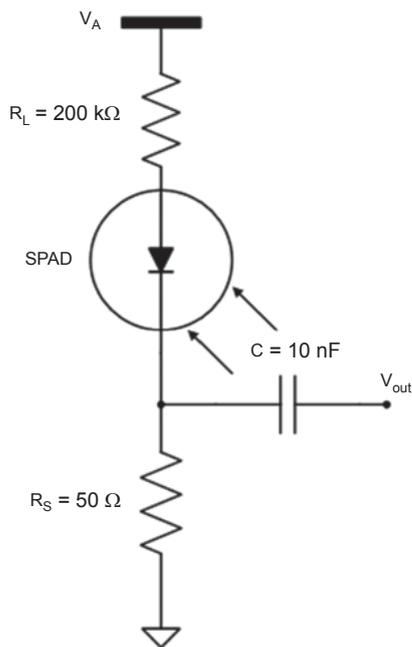


圖 4. 單光子崩潰二極體之被動截止電路圖。

體的性能參數主要有四個：暗計數 (dark count rate, DCR)、光子偵測率 (photon detection probability, PDP)、二次崩潰機率 (afterpulsing probability, APP)、以及時基抖動 (timing jitter)。其中，暗計數指的是在沒有光子入射的條件下，單位時間內元件的崩潰次數，所以其物理單位為 Hz，一般暗計數的來源可以分為三種：能帶躍遷 (band-to-band transition，透過 Shockley-Read-Hall, SRH 過程)、能帶穿隧 (band-to-band tunneling)、以及二次崩潰。其中 SRH 過程主導了多數 CMOS 單光子崩潰二極體在室溫下的暗計數表現，目前低暗計數 (約幾十到幾百 Hz) 的單光子崩潰二極體已經是多數研究團隊的日常，圖 5 是我們利用 $0.18 \mu\text{m}$ 高壓 CMOS 製程所製造，直徑 $20 \mu\text{m}$ 元件的暗計數與偏壓關係的量測結果。

光子偵測率是該元件對光子偵測的敏感度指標，實驗上的定義方式為每入射一個光子，產生一次崩潰事件的機率，可以用下式表示。

$$\text{PDP} = \frac{\text{photocounts} - \text{darkcounts}}{\text{number of incident photons}} \times 100\% \quad (1)$$

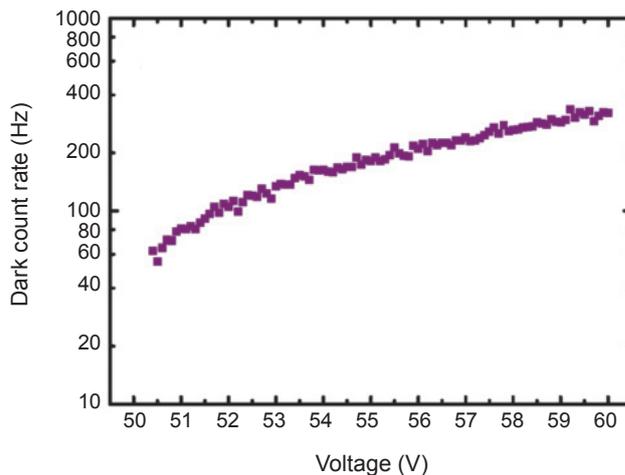


圖 5. 單光子崩潰二極體之暗計數與偏壓關係圖。

其中 photocounts (光計數) 指的是元件照光時，單位時間的崩潰次數；將光計數減去 darkcounts 即暗計數，即可得到照光下崩潰次數增加的淨值，再除以入射的光子數目，就可以得到光子偵測率。需要注意的是，第一、光子入射時有可能元件是在無法偵測光子的 *deadtime* 中，應盡可能降低入射光子數來使此可能性發生的機率降至可忽略的程度；第二、通常在量測光子偵測率時，入射光強度會低到一般光偵測器無法量測的功率等級，所以精確的入射光量校正，是量測時必須注意的地方。

就元件物理層面來說，CMOS 單光子崩潰二極體的光子偵測率會受到下列因素影響：(1) 元件表面穿透率；(2) 入射光波長；(3) 元件內部結構；(4) 元件超額偏壓⁽⁴⁾。其原因可以用其偵測光子的物理過程來說明，如圖 6 所示，光子入射時，必須先穿透元件與空氣的界面，在 CMOS 製程中，矽 PN 二極體與空氣之間會有許多介電層 (dielectric layer)，其會造成光的干涉與反射現象，所以入射光的穿透率 (T) 與這些介電層的光學條件以及入射光的波長有關，如果想要增加穿透率，就必須精準地控制這些條件，或者採用 CMOS 影像感測器 (CMOS image sensor, CIS) 的製程。當光子入射到 PN 二極體後，就會被矽吸收，其吸收係數 (absorption coefficient, α) 與波長有關，波長愈長的光吸收係數愈小，也越能穿透到元件深處，因此 PN 二極體的結構設計會影響其響應波長的峰

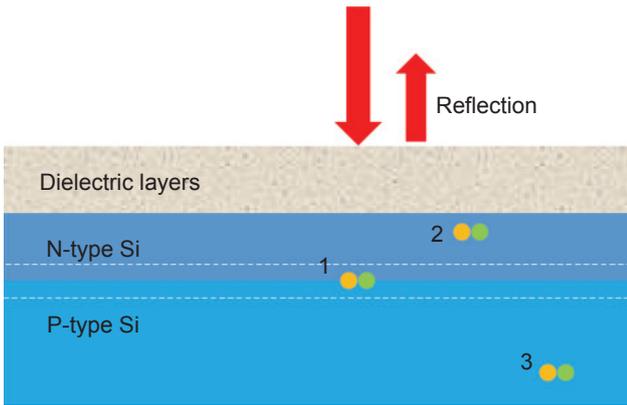


圖 6. 單光子崩潰二極體之光子偵測示意圖，其中 PN 接面附近的虛線代表空乏區範圍，光子吸收產生電子電洞對的位置可能為空乏區 (1)，N 型中性區 (2)，或 P 型中性區 (3)。

值落在何處，一般而言，CMOS 單光子崩潰二極體的響應波長範圍在 400–1000 nm，峰值則座落在 500–700 nm 之間，依元件結構與偏壓條件而定；接著，當光子在特定位置被吸收，產生了電子電洞對之後，這些載子會以漂移 (drift, 空乏區內) 或擴散 (diffusion, 中性區內) 方式移動，便有機會 ($\eta_{collect}$) 來到極高電場的雪崩區域 (avalanche region)，如果在此區域能夠透過大量的衝擊離子化過程觸發崩潰事件，也就是引發了足夠大的崩潰電流被外部電路偵測到，就完成了一次光子偵測。因觸發崩潰的機率與電場強度有高度相關性，所以超額偏壓越大，載子觸發崩潰的機率 (η_{trig}) 越高。綜合以上所述，光子偵測率可以用下式表示。

$$PDP(\lambda, V) = T(\lambda) \int_0^t \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z} \cdot \eta_{collect}(z, V) \cdot \eta_{trig}(z, V) dz \quad (2)$$

因為在各種應用中所使用的光波長不同，所以可以隨應用進行元件結構與表面介電層的調整，只是這些調整在以電路功能為主體的 CMOS 製程中不易達成，也會增加晶片製作的成本。

第三個元件參數是二次崩潰機率，其成因是在崩潰事件中，大量載子流經元件內部，因為元件中難免有會捕捉載子的晶體缺陷 (defect traps)，特別

是在空乏區中的缺陷捕捉到載子後，會在一定的時間間隔後將載子釋放，這段時間稱作缺陷的生命週期 (lifetime)，依缺陷的不同，其值一般約在幾 ns 到幾 μs 之間；如果該載子被釋放時，單光子崩潰二極體已經回到崩潰電壓之上進入偵測光子狀態，也可能會被該缺陷釋放的載子觸發崩潰，造成錯誤的偵測。由此，二次崩潰的機率是指單一次崩潰事件造成後續崩潰事件的機率，一般希望越低越好，目前一般都在 2% 以下；必須提醒的是，二次崩潰機率會隨著元件的死亡時間延長而下降，在評估時應考慮操作時的死亡時間長度，而在不同應用中也可以適度使用電路調整死亡時間來減少之。

最後一個元件參數是時基抖動，定義為從光子到達元件，至外部電路偵測到崩潰事件這段時間的統計變異 (statistical variation)，也就是單光子崩潰二極體對於量測光子到達時間 (arrival time) 的準確性，如應用在時間飛行法 (time of flight, TOF) 之光學測距時，此時間準確性會轉換成對距離量測的準確度。目前一般認為時基抖動的主要成因有二，光子吸收產生電子電洞對的位置差異，以及崩潰電流的橫向傳遞；光子吸收發生在空乏區或中性區 (neutral region)，因為其載子移動機制的不同，會導致到達雪崩區所需時間有差異性；而崩潰在建立時若要擴及整個元件，就會經歷橫向傳遞的過程，此過程與一開始崩潰發生的橫向位置有關，也會造成時間上的變異性。圖 7 所示為我們的單光子崩潰二極體時基抖動的量測結果，可以看到在主要峰值

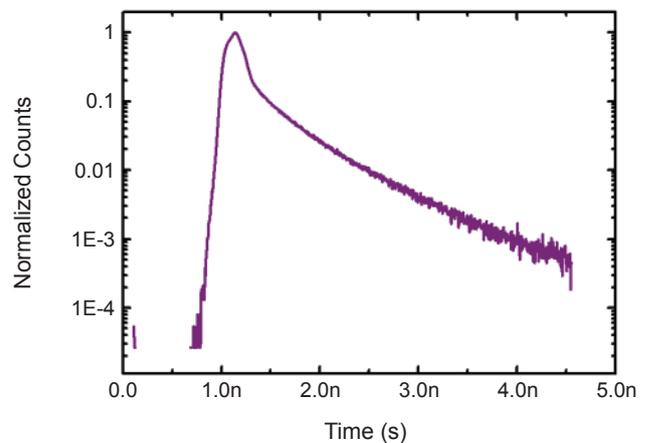


圖 7. 單光子崩潰二極體之時基抖動量測結果。

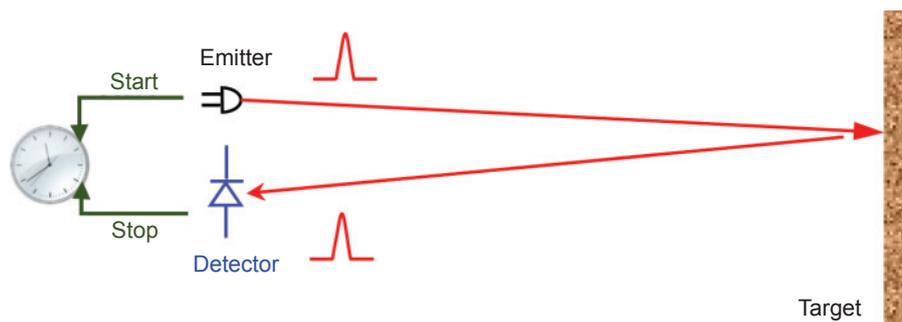


圖 8. 利用飛行時間法之光學測距示意圖。

附近的半高寬約在 150 ps 左右，而之後有一個較長的尾巴 (diffusion tail)，則是由在中性區吸收光子透過擴散後引發崩潰事件所貢獻的。

三、單光子偵測器於光學雷達之應用

1. 光學雷達背景與原理

了解單光子崩潰二極體的操作原理與相關參數之後，我們要接著介紹其最受矚目的一種應用—車用光學雷達。近年來，不論是為了增進行車安全的先進駕駛輔助系統 (advanced driver assistance system, ADAS)，或是無人駕駛自動車 (autonomous cars)，都把光學雷達視為其必要配備之一，在此關於行車安全智慧監控的應用情境中，為了延長意外發生前的反應時間，長距離探測的應用更顯重要，目前雷達 (radar) 測距的應用範圍因空間解析度不足以辨識行人，使得光學雷達在車輛高速行駛下，長距離高解析度的安全監測上扮演重要角色；正因如此，這幾年先進的駕駛輔助系統中 (advanced driver assistance system, ADAS)，利用單光子崩潰二極體配合脈衝雷射，透過量測光子飛行時間的方式，來開發高解析度的光偵測與測距技術 (light detection and ranging, LiDAR)，通稱為光學雷達或光達，成為許多歐美知名車廠的重點研發項目。其中以日本 Toyota 研究室團隊於 2013 與 2014 年發表的工作最具代表性⁽²⁾，他們利用單光子崩潰二極體搭配 TDC (time-to-digital converter) 電路開發出 200×96 像素完成 100 公尺的測距機，在此研究中，他們利用 $0.18 \mu\text{m}$ 的 CMOS 高壓製程，透過 system-on-chip (SoC) 的概念，在單一晶片上整合了單光子崩潰二極體元件陣列、TDC、數位訊號處

理以及記憶體 (SRAM) 等，不僅降低了系統的複雜度，同時壓低了所需的成本，其目前在 100 公尺的測距能力上，利用平均功率為 21 mW 的雷射，可達到 0.14% 的距離準確度 (14.2 公分)，擷取速度可達 10 frames/s。此指標性的研究成果，充分顯現出 CMOS 單光子崩潰二極體在行車安全智慧監控上的應用潛力。

所謂光學雷達，其實就是一種光學測距方法，直接時間飛行法之基本原理如圖 8 所示，利用一個短脈衝雷射產生短脈衝光子源，在發射光子的同時啟動計時器開始計時，等到光子經待測物散射回到光偵測器後，光偵測器送出訊號停止計時，此段時間乘以光速再除以 2，就得到待測物的距離，是一個相當簡單可靠的測距方式。由此可知，脈衝光源、光偵測器、與計時器構成單點光學雷達的核心部分，再透過掃描或者陣列成像，就可以完成 3D 光學雷達的功能。在脈衝雷射光源部分，其波長必須在人眼不可見的紅外線範圍來避免傷害眼睛，脈衝寬度則越短越好，可以提供測距更高的準確性；在車用光學測距的應用中，通常希望能夠盡可能加長感應距離來爭取反應時間，但是因為待測物通常會散射雷射光，使得能夠回到偵測器的光子數大大降低，此效應在距離越遠時越嚴重 (測得光子數約與距離平方成反比)；因此，若要增加可測距離，就必須增加雷射功率，但此舉會對模組成本造成沉重負擔，也增加光源驅動電路的複雜度，另一解決之道則是採用更敏感的光偵測器，所以 CMOS 單光子崩潰二極體與其整合電路，被認為是取代目前使用的雪崩光電二極體，以解決目前車用光學雷達高成本、高複雜度的重要關鍵組件。

2. 單光子崩潰二極體之光學雷達模組

我們自 2015 年六月起，得到國家實驗研究院「物聯網感測器專案計畫」的經費支持，並在工研院資通所與國研院儀器科技研究中心的技術協助下，進行 CMOS 單光子崩潰二極體的元件開發、光學雷達模組的建置與測試工作，目前 (2017 年六月) 已經完成了單點測距的功能展示，以下將簡述我們在這方面的成果。

我們根據我們先前元件製程的相關經驗，利用台積電所提供的高壓 $0.18\ \mu\text{m}$ 的 CMOS 製程來製作，由於是透過 MPW (multiple projects wafer) 服務，並未引入任何客製化 (customization) 製程步驟。我們透過 TCAD 與相關電路模擬 (simulation program with integrated circuit emphasis, SPICE) 來進行參數模擬，根據元件參數來針對各種可能性進行評估，並考慮所採用之元件結構與截止電路對各個參數的影響來進行設計。自台積電取得晶片後，設計相關電路板並進行晶片打線後，並在儀科中心的協助下建置光學雷達模組，來進行相關距離量測。值得一提的是，由於我們採用的是未客製化之 CMOS 製程，一方面成本低廉，另一方面對於後續電路整合與系統發展應用也提供相當有利的起點。

此晶片之設計為由 24 個單光子崩潰二極體形成的 6×4 陣列，或稱作矽光電倍增管 (silicon photomultiplier, SiPM)，晶片佈局圖與實際晶片之顯微鏡照片如圖 9 所示，其中單一單光子崩潰二

表 1. 單光子崩潰二極體之單點光學雷達特性表。

Items	Current
SPAD macro pixel	6 4
CMOS process	$0.18\ \mu\text{m}$ HV
Fill factor	35 %
Wavelength	780 nm
Modulation frequency	1 MHz
Illumination power	0.13 mW
Optical pulse width	50 ps
Integration time	0.1 s
Target reflectivity	White paper
Distance range	100 m
Background light	50 klux
Relative precision	0.02 %

極體的直徑為 $20\ \mu\text{m}$ ，崩潰電壓約在 48 V，在 53 V 的暗計數小於 1 kHz，採用被動截止、主動重置 (passive-quenching active-reset) 電路，死亡時間最短約在 2 ns，但在後續測試中只調整至 12 ns；陣列的填充因子 (fill factor) 約為 35%，同一區的 6 個單光子崩潰二極體訊號在經過單穩 (monostable) 電路累積後，可分別輸出到四個接點，以利後續之訊號處理，亦可全部一起輸出，晶片左下角同時製作了一個單光子崩潰二極體，方便用來評估單一元件特性。

表 1 為我們測得的單光子崩潰二極體之光學雷達特性表，此晶片設計的 fill factor 為 35%，較大

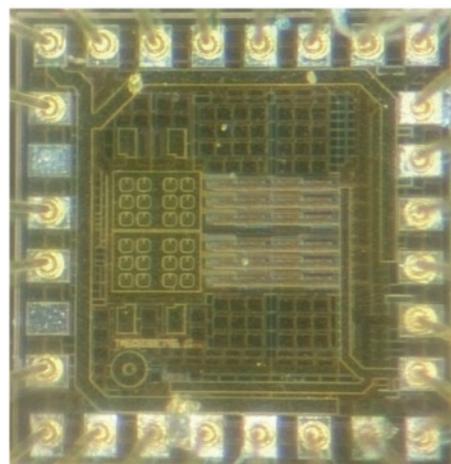
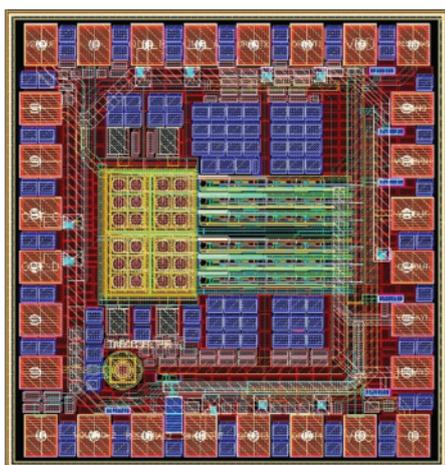


圖 9. 晶片設計佈局圖 (左)，與晶片打線後在顯微鏡下實際照片 (右)。

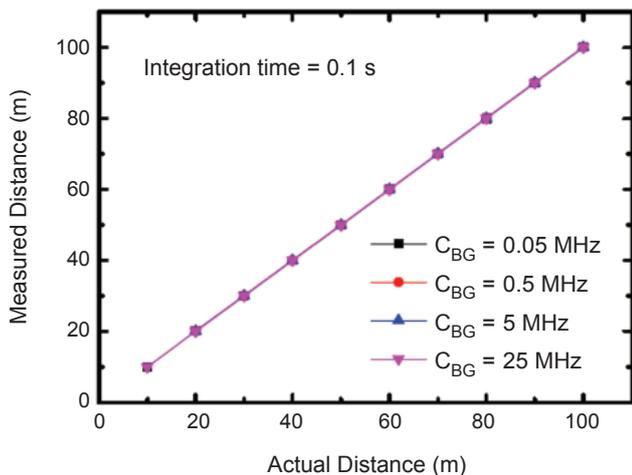


圖 10. 在各種背景光強度下，量測距離與實際距離的關係圖。

的有效感光面積有利於遠距的弱光偵測；採用的雷射是商用的短脈衝雷射 (Pico-Quant)，重複率設定在 1 MHz，波長 (780 nm) 與最大平均功率 (0.13 mW) 也受其決定；在此條件下，我們採用 0.1 s 的積分時間，以 Bosch 的測距儀為校正基準，進行 10–100 公尺的測距，其中 TCSPC (time-correlated single-photon counting) 的峰值取法採用 CM (center of mass) 法，量測結果如圖 10 所示；因為在一般車用情境中，會有強烈的太陽光是無法透過濾鏡去除的，因此我們測試了模組在不同背景光強度下的表現，其中背景光 25 MHz 約相當於 50 klux 的戶外環境，從測試結果可知，即使在 25 MHz 背景光下，仍能夠達成 100 公尺的測距；圖 11 則是針對 100 公尺進行連續 20 次的測量，結果在 20 次的量測中，100 公尺的量測標準差為 1.8 公分；由此可知，該晶片所展現的測距能力相當優越，如能提高雷射的功率，應可大大降低其所需的積分時間，因此，我們對於其在未來車用測距的應用潛力相當有信心。

四、結語與展望

本文依序介紹了 CMOS 單光子崩潰二極體的操作原理、元件參數與其在光學雷達上的應用潛力，近年來在自動駕駛無人車的議題發酵之下，單

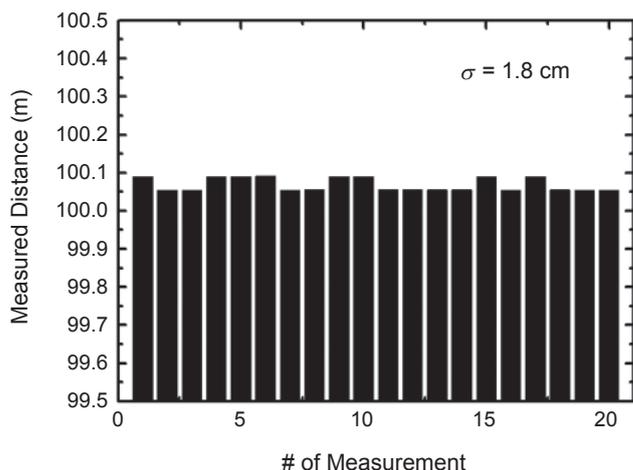


圖 11. 在 25 MHz 的背景光下，積分時間 0.1 s 時，100 公尺測距 20 次的量測結果。

光子崩潰二極體之光學雷達應用發展神速，許多傳統車廠與新創公司投入大量資金與人力加速開發，預計在 2020 年左右就會有成本低廉且性能優越的模組問世，讓人充滿期待。台灣在其相關的技術組件上，包括光學模組設計與製造 (如大立光、中強光電等)、IC 製造、設計與驗證 (如台積電、聯電、聯發科等)、以及高功率短脈衝雷射光源的製造 (華尚光電、聯亞光電等) 方面，都有深厚基礎與競爭利基，可惜在此議題上缺乏整合與前瞻性作法，在研發進度上似乎布局太晚且野心不足，恐怕無法居於領先地位；然而，以傳統上台灣在國際科技業的角色扮演而言，此時應仍能迎頭趕上，成為特定組件的優先供應廠，若能如此，不僅商機可期，也能為未來增進行車安全盡一分心力。

誌謝

我們在此感謝多年來科技部、教育部與國研院在相關研究經費上的支持，也要對工研院資通所與國研院儀科中心在技術上的支援，以及國家高速電腦中心在元件模擬上的計算資源提供的重要協助，表達致謝之意。另外，我們也要謝謝對我們研究群中，那些曾經在這個主題上貢獻心力，如今已經畢業研究生，謝謝你們的努力、堅持與付出，沒有你們，也就沒有這些有趣堪稱豐富的研究成果。

參考文獻

1. E. Charbon, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, **372**, 20130100 (2014).
2. C. Niclass, M. Soga, H. Matsubara, M. Ogawa and M. Kagami, *IEEE J. Solid-State Circuits*, **49**, 315 (2014).
3. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. New York: Wiley, (1981).
4. M. W. Fishburn, *Fundamentals of CMOS Single-Photon Avalanche Diodes*, Google (2012).



林聖迪先生為台灣國立交通大學電子工程博士，現任交通大學電子工程學系教授。

Sheng-Di Lin received his Ph.D. in electronics engineering from National Chiao Tung University. He is currently a professor in the Department of Electronics Engineering at National Chiao Tung University.



蔡嘉明先生為交通大學電子工程博士，現任國立交通大學電子工程學系教授。

Chia-Ming Tsai received his Ph.D. in electronics engineering from National Chiao Tung University. He is currently a professor in the Department of Electronics Engineering at National Chiao Tung University.



黃煒勛現為國立交通大學電子工程學系碩士生。

Wei-Syun Huang is currently a M.S. student in the Department of Electronics Engineering at National Chiao Tung university.



劉泰祥先生為國立交通大學電子工程學系學士，現為國小老師。

Tai-Hsiang Liu received his B.A. in electronics engineering from National Chiao Tung University. He is currently a teacher in a elementary school.



吳岱融先生現為國立交通大學電子工程學系碩士學生。

Dai-Rong Wu is currently a M.S. student in the Department of Electronics Engineering at National Chiao Tung University.