

382182

A4
C4

382182

申請日期	87.10.31
案號	87113285
類別	H04N 7/18 H03F 3/08

(以上各欄由本局填註)

發明專利說明書

一、發明名稱	中文	用於對光檢測器作單一光子讀出動作之超低雜訊高帶寬介面電路
	英文	ULTRA-LOW NOISE HIGH BANDWIDTH INTERFACE CIRCUIT FOR SINGLE-PHOTON READOUT OF PHOTODETECTORS
二、發明人	姓名	(1) 雷斯特J. 考茲羅斯基 (2) 威廉A. 克萊恩漢斯
	國籍	美國
	住、居所	(1) 美國加州希蜜谷高登芬巷212號 (2) 美國加州西湖鄉村石門街1789號
三、申請人	姓名 (名稱)	美商·洛克威爾科技中心公司
	國籍	美國
	住、居所 (事務所)	美國加州千橡市喀米諾多士黎歐斯1049號
	代表姓名	約翰 J. 丹肯

(由本局填寫)

承辦人代碼：

A6

大類：

B6

IPC分類：

本案已向：

美國(地區) 申請專利，申請日期： 案號： 有 無主張優先權

1997,8,13 08/910,342

有關微生物已寄存於： 寄存日期： 寄存號碼：

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁各欄)

裝

訂

線

經濟部中央標準局員工消費合作社印製

五、發明說明(1)

發明領域

本發明係關於在低光條件下的超低雜訊光子檢測，且更特別地關於用於在視訊訊框率易得光檢測器之單一光子讀出的一種超低雜訊、高增益介面電路。

相關技藝描述

光學感測器將在 X 射線 ($\lambda = 0.2 \mu\text{m}$) 可見的 ($\lambda = 0.4 - 0.8 \mu\text{m}$)、接近紅外光 (IR) ($\lambda = 0.8 - 2 \mu\text{m}$)、短波 IR ($\lambda = 2.0 - 2.5 \mu\text{m}$)、中波 IR ($\lambda = 2.5 - 5 \mu\text{m}$)、和長波 IR ($\lambda = 5 - 20 \mu\text{m}$) 頻帶的入射輻射信號轉換成被用作如在即時數位視訊信號的資料收集、處理、及儲存之電氣信號；可獲的如光二極體和光傳導器的光檢測器是不昂貴的，展現支持電流視訊訊框率的帶寬，對於深入長波 IR 帶的波長是敏感的，當用在影像陣列中時展現一高級之像素對像素均勻度；然而，這些光檢測器不具增益，亦即各入射光子產生一單一電子，且因此光檢測器影像系統對於強光情況適當地良好工作，但產生在低光位準的電氣信號，其為過小以致無法被習用讀出電路讀出。

在低光條件下，標準光檢測器被展現足夠增益的一崩潰光二極體所取代使得習用讀出電路可以視訊訊框率用一高信號對雜訊比 (SNR) 讀出該資料；因為必須展現極高受控制增益和極低的雜訊，故崩潰光二極體之製造遠比標準光檢測器更困難和昂貴；再者，目前可獲的崩潰光二極體展現相當差的均勻度，受限於比標準光檢測器 ($1.5 \mu\text{m}$) 更低的波長，並因它們相當低的量子效率而限制敏感性；

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

訂

五、發明說明(2)

影像強化系統使用一陣列之崩潰光二極體以驅動如 CCDs 或磷的個別顯示元件，並因光二極體之限制而具有甚至更低的波長能力（大約 $0.6 \mu m \max$ ）。

1984年二月號在電子元件上的 IEEE 期刊 Vol. ED-31, No.2, pp.175-182 的張伯倫等人之“一種新式寬動態範圍矽光檢測器和線性影像陣列”描述用於標準光檢測器之單一光子讀出的一閘極調變技術；張伯倫提出包括其之閘極被連接至其之汲極的一負載 FET 的一高增益電流鏡以確定次臨界操作並除去臨界電壓 V_t 非均勻度；否則與標準矽 CMOS 製造過程關聯的像素對像素 V_t 非均勻度將實質地劣化該成像陣列之性能；來自光檢測器的信號被射入負載 FET 因而產生在一增益 FET 之閘極的一信號電壓；此信號調變增益 FET 之閘極電壓，因而在一儲存電容器中儲存經由一對 FET 切換器被讀出和重置的積集電荷。

雖然張伯倫之特殊增益調變技術提供一大動態範圍並能夠檢測在長波 IR 範圍內的波長，電流鏡之帶寬嚴重地限制整個檢測器之帶寬；特別是，被光檢測器所見的 RC 時間常數是光檢測器之電容量和負載 FET 之電阻值的並聯組合；在次臨界操作中，該 FET 之互導很低，且因此，它的負載電阻值很大，在 10^{14} 歐姆之等級上；結果，RC 時間常數是在秒之等級上；因此，張伯倫之閘極調變技術只對如星辰的影像靜態影像有實際的用處；再者，為了達到大的電流增益，負載 FET 典型上十分小；結果，負載 FET 展現實質的 $1/f$ 雜訊，在低光條件下其嚴重地劣化成像陣列之性能。

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

五、發明說明(3)

1996年4月號 SPIE Vol.2746, pp.93-100的 Kozlowski 等人之“在室溫的 SWIR 注視 FPA 性能”描述在短波長紅外線 (SWIR) 帶中的一所謂“夜熾光”現象，其致能在光子通量在每成像圖框有一百個光子之等級上的極暗夜晚的檢測；Kozlowski 詳述與兩不同讀出電路一起使用的 InGaAs 和 HgCdTe 檢測器陣列；兩者皆使用張伯倫之閘極調變技術，但是其一也緩衝檢測器節點以維持恆定檢測偏壓；不像 SWIR 帶和較長波長檢測器陣列地，接近 IR 和可見檢測器對於在檢測器偏壓中的改變並不敏感，且因此緩衝以維持恆定偏壓是無關的。

本發明之概要

在觀察上面問題中，本發明提供用於以視訊訊框率從 x 射線 至長 IR 帶的已知光檢測器之單一光子讀出的一種超低雜訊、高增益介面電路。

此以藉由連接在一低雜訊、高增益放大器之負回授迴路中的負載 FET 之閘極至源極電壓的已知電流鏡組態而完成；當入射通量趨向每訊框零光子時，該回授迴路對被電流鏡設定的 RC 時間常數而緩慢下來因而避免不穩定；當通量增加時，放大器恢復並加速該回授迴路；此有效地減小以放大器之增益被光檢測器所見的阻抗因而以相同量減小介面電路之 RC 時間常數；因為該放大器插連有一給予通量位準的負載 FET 之閘極電壓，故負載 FET 之 $1/f$ 雜訊 被傳送至放大器因而致能單一光子讀出敏感度；在一較佳實施例中，切換的電容器被使用以線性化該電路；該介面電路較

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

五、發明說明 (4)

佳使用有一薄氧化層的高品質環氧或中子變質摻雜的晶圓來製造以提供適當的臨界電壓 V_c 均勻度。

本發明之這些和其它特徵與利益將從與伴隨圖式一起取用的下面較佳實施例之詳細說明而對那些熟知該技藝者為清楚，其中：

圖式之簡單說明

第 1 圖係根據本發明用於已知光檢測器之單一光子讀出的一超低雜訊、高增益介面電路之一結構圖；

第 2 圖係在第 1 圖中所示的介面電路之負載線的一個 I-V 繪圖；

第 3 圖係用於在視訊圖框率的已知光檢測器之單一光子讀出的一超低雜訊高增益線性化介面電路之一結構圖；

第 4 圖係在第 3 圖中所示的線性化介面電路之負載線的一繪圖；

第 5 圖係在介面電路中所用的一單端放大器之一實施例的一結構圖；

第 6 圖係在介面電路中使用的差分放大器之一實施例的一結構圖；及

第 7 圖係在第 1 圖中顯示的介面電路之一混合信號實施例的一簡化截面圖。

較佳實施例之詳細說明

本發明提供能夠在極低光條件下，亦即光子通量位準接近每取樣期間零光子的光檢測器之單一光子讀出的一種帶寬、超低雜訊之介面電路；此電路可被使用以計數入

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

裝

五、發明說明 (5)

射於個別光檢測器或作為對一習用視訊系統的前端的一成像陣列上的光子；本方法之主要優點之一在於該電路可使用如光二極體或光導體具有零增益的易得光檢測器而非崩潰光二極體；已知光檢測器較價廉、更均勻、容易製造、更可靠、對雜訊較不敏感及比目前崩潰光二極體可獲得較長的波長。

如在第 1 圖中所示，一光檢測器 10 將一小信號檢測器電流 I_{det} 注入一負載 FET 12 引起它的閘極至源極電壓自我調整；此又調變一增益 FET 14 之閘極至源極電壓使得它導通為光電流之一放大複本的一信號電流 I_{sig} ；形成一電流鏡的該等 FET 被偏壓以提供一極大電流增益；在一千二百萬等級上的電流增益已在實驗室條件下被測得；一低雜訊、高增益放大器 16 被連接在環繞負載 FET 之閘極至源極電壓的一負回授迴路中以擴大電路之帶寬並減小它的雜訊；因此，被電流鏡和放大器界定的介面電路 17 在維持一高 SNR 時利於在極高帶寬的信號電流之連續或取樣讀出。

在一百萬之等級上的放大器 16 之增益加速負載 FET 之閘極至源極電壓之自我調整，有效地以增益除被光檢測器所見的 RC 時間常數；當光子通量趨近零時，放大器之負回授迴路出現慢下來朝向被 RC 時間常數設定的帶寬因而維持一穩定閘極電壓；並不知道在如此低通量位準是否可達到穩定；習用方法指出該放大器將接引於它的供應電壓或大地因而破壞該信號直到通量位準增大為止；隨著通量增加，放大器恢復並加速以再擴大電路之帶寬；放大器也插連

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

五、發明說明 (6)

對於一給予檢測電流的負載 FET 之閘極電壓使得它的 $1/f$ 雜訊被傳送至放大器因而降低電路之雜訊致使可達到單一光子感測。

在第 1 圖中所示的特殊電路構圖係一全 N 通道、非反轉介面電路，其展現一非線性小信號電流增益 $A_i = g_{gain}/g_{load}$ ，在此 g_{gain} 和 g_{load} 分別是負載和增益 FET 之互導；特別是，光檢測器 10 為一光二極體其之陽極 18 被保持在如大地或 +5V 的一共同電壓 V_{common} 且其之陰極 20 將光電流注入負載 FET 之汲極 22；FET 之源極 24 被保持在一個偏壓電壓 V_{bias} ，其可使用帶隙參考電路而離晶或在晶地產生，其反向偏壓光二極體 10；光二極體也展現與光二極體並聯連接的一寄生電容量 C；展現無增益的 InGaAs、HgCdTe、或 III-V 化合物光二極體可在此組態中被使用；該特殊設計將依賴於期望的操作溫度和波長並必須提供遠小於被照射檢測器電流的一黑暗電流。

因為檢測器電流 I_{det} 很小，負載 FET 12 在它的次臨界區中操作，此處 FET 之通道低於用來傳導的臨界，但因少量之帶熱能電子而一些電流仍流過；結果，電流為閘極至源極電壓 V_{gs} 之一幕次函數，其為：

$$I_{det} = k_1 \exp(V_{gs} - V_t) \quad (1)$$

此處 V_t 為臨界電壓而 k_1 為被 FET 造形、載子流動性、等等所決定的一常數。

為在被 FET 之閘極至源極電壓之調變所導出的汲極電流上的差分改變的負載 FET 之互導 g_{load} 正比於它的汲極電

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

訂

五、發明說明 (7)

流，亦即檢測器電流 I_{det} ；因此，在次臨界區中，FET 之互導很小，其為達到高電流增益所必需；然而，該互導為小故被光二極體所見的輸出電阻值為大，在 10^{14} 歐姆之等級上；因此，等於寄生電容量 C 和 FET 之輸出電阻值 R 的並聯組合的光二極體之 RC 時間常數為大，在秒之等級上。

放大器 16 被連接在圍繞負載 FET 12 之閘極至源極之一負回授組態中；特別是，放大器之輸入 25 被連接至 FET 之源極 24 且它的輸出 26 被連接至 FET 之閘極 27；放大器 16 可以是在第 5 圖中所示型式之一單端反相放大器或是在第 6 圖中所示型式之一差分放大器；單端放大器需要較少晶片空間但差分放大器提供較大增益並具有較佳共模互斥比 (CMR)；該放大器，且特別是它的負回授迴路，以放大器之增益加速負載 FET 之自我調整過程；典型的放大器增益係在一百萬之等級上使得有效時間常數係在微秒之等級上，遠小於共時的數位視訊系統之取樣期間；對於一給予通量該放大器也穩定在閘極 27 之電壓使得它對負載 FET 之 $1/f$ 雜訊不敏感。

增益 FET 14 較佳與負載 FET 12 共用一共同閘極 27 以減小 V_t 非均勻度；增益 FET 之汲極 28 被連接至輸出端子 OUT 且源極 30 連接至一增益電壓 V_{gain} ，其可使用帶隙參考電路而離晶或在晶地產生，其偏壓要飽和操作增益 FET；信號電流 I_{sig} 係閘極至源極電壓之一個二次函數，其為：

$$I_{sig} = k_g (V_{gs} - V_t)^2 \quad (2)$$

此處 k_g 為被 FET 造形、載子流動性、等等所決定的一常數

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

五、發明說明 (8)

；增益 FET 之互導 $g_{gain} = 2(k_g I_{s1g})^{1/2}$ ；因此，在飽和中增益 FET 之互導，並因此介面電路之電流增益 A_i ，可藉由控制 k_g 之值而做得相當大；因為負載和增益 FET 在不同區中操作，亦即分別在次臨界區和飽和區，故電流增益 A_i 為檢測器電流 I_{det} 之函數；特別是，增益曲線展現一對數響應。

雖然被描述為一全 N 通道實施例，該介面電路可用一些或全 P 通道 FET 來實施；在一全 P 通道電路中，負載 FET 之源極被連接至光二極體而它的汲極連接至 V_{bias} ；在此構圖中，放大器建立光二極體之反向偏壓；P 通道增益 FET 被與 N 通道增益 FET 相同地連接；為了實施一反相電路，FET 之一為 N 通道而另一為 P 通道；如在第 3 圖鐘所詳示的，介面電路可被線性化使得藉由將大電阻與支配 FET 之互阻抗的個別 FET 串聯連接使得電流增益被這些電阻之比率所設定，而增益可獨立於檢測器電流。

第 2 圖係說明在第 1 圖中所示的介面電路之小信號操作的一個 I-V 繪圖（未依尺度）；如所示的介面電路在光二極體之響應曲線 32 之反向偏壓區，即 $V < 0$ ，中操作；依據慣例，為了清楚，負載 FET 之冪次負載線 34 和增益 FET 之二次負載線 36 被繪製在電壓軸之相反側上；負載線之斜率代表 FET 之互導。

在一給予通量，光二極體之響應曲線 32 交叉負載 FET 之負載線 34 因而設定它的開極至源極電壓；負載 FET 之 V_{gs} 映於增益 FET 之負載線 36，其建立信號電流 I_{s1g} ；在入射

（請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁）

訂

五、發明說明(9)

通量上的一改變引起光二極體之響應曲線 32 以 ΔI_{det} 移變；結果，負載 FET 之工作點沿著它的負載線 34 移動至新交叉點，亦即負載 FET 以 ΔV_{gs} 自我調整它的閘極至源極電壓以導通光電流；相同的 ΔV_{gs} 沿著它的負載線 36 移動增益 FET 之工作點，產生在信號電流上的一改變 ΔI_{sig} 。

為了達到大的電流增益，負載 FET 被偏壓使得在光電流上的一小改變導出在閘極至源極電壓上的一大改變，而增益 FET 被偏壓使得在它的閘極至源極電壓上的一小改變導出在信號電流上的一大改變；換言之，在反向偏壓區中負載 FET 之負載線 34 相當平坦而增益 FET 之負載線 36 相當陡峭，遠較實際上在 I-V 繪圖中所示的更平坦和更陡峭；電流增益作為光電流之一函數的對數本質從負載線 34 和 36 之冪次和二次形狀而明顯的。

第 3 圖係介面電路之一替換實施例，其中電流增益為恆定且信號電流 I_{sig} 以視訊訊框率被取樣和讀出；該介面電路被“線性化”以藉由將一對電阻 R_1 和 R_g 連接在 FET 之個別源極 24 和 30 與大地間並將增益 FET 之閘極 38 連接在負載電阻 R_1 之頂端而移除對光電流之對數依賴；結果，在負載 FET 之閘極的電壓被插連且它跨過負載電阻 R_1 的源極電壓被光電流調變；電阻是大得足以支配 FET 之互阻抗使得電流增益 $A_i = R_1 / R_g$ 。

在該較佳實施例中，兩電阻皆實施為切換電容器，其之阻值可被變化以設定電流增益；最簡單的切換電容包括在負載 / 增益 FET 之源極和大地間被並聯連接的一電容器

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

五、發明說明 (10)

40和一FET切換器42；FET切換器42被脈波寬度調變以交替地對電容器40充放電；脈波寬度被控制以設定切換電容器之阻值 R_1 和 R_2 以建立一期望的電流增益；如在第4圖中所示，分別與負載和增益FET關聯的負載線44和46現在為線性的具有恆定斜率 $(1/R_1)$ 和 $(1/R_2)$ 使得不管在光電流上的改變地電流增益被保持恆定。

在第3圖中所示的實施例中，信號電流 I_{s1} 將積集電荷儲存在被連繫於供應電壓 V_s 並經由一對FET切換器52和54被讀出和重置的一儲存電容器50；取用和重置FET切換器52和54分別被連接在一端子DISC與大地和共同輸出端子OUT之間；取用切換器52之閘極56用以一取樣頻率 f_s 切換的一電壓 V_a 驅動，以取樣跨過儲存電容器發展的電壓 V_s 並在DISC端子輸出一分段的電壓信號 V_{s1} ；重置切換器54之閘極58用以一取樣頻率 f_s 切換的一電壓 V_r 驅動，作為取用切換器，但對儲存電容器50之放電則有180度之相位差；取樣頻率 f_s 超過被RC時間常數界定的帶寬但小於電路之擴大的帶寬使得分段的電壓信號正確地追隨小信號檢測器電流。

第5圖說明用在第1和3圖中所示的介面電路中之一單端放大器的一實施例；在單端CMOS反相放大器中，其之電壓比先前提出者更負的一輸入信號 V_i 引起p-MOSFET驅動器60更強狀地導通；在響應上，因為負載FET（其之公稱工作阻值被閘極電壓 V_{b1} 設定的一n-MOSFET元件62）之相關工作阻值將正比地大於先前者，故放大器之輸出電壓結

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

線

五、發明說明 (11)

果擺至一更正的電位；其之電壓是更正的一輸入信號 V_{in} 引起驅動 MOSFET 60 較不強壯地導通，結果的輸出電壓 V_o 。因此在相反於輸入信號之者的一方向上再搖擺；此基本階接的 CMOS 反相放大器（含具有相同於該 p-FET 驅動器之造形並被閘極電壓 V_{b1} 偏壓的一 p-MOSFET 階接 64）之開迴路增益為：

$$A_v = - \left[\frac{g_m * r_d}{1 + \frac{r_d}{R_1}} \right] \quad (3)$$

此處 g_m 為 p-MOSFET 放大器之互導， r_d 為負載 MOSFET 之汲極至源極阻值而 R_1 為在放大器輸出的負載阻值；因為對於所要的應用此負載經常是純電容性的，故分母常為一；在不用一階接 MOSFET 中，增益被限於 $-g_m * r_d$ 。

第 6 圖說明用在第 1 和 3 圖中所示的介面電路中之一差分放大器的一實施例；在差分 CMOS 放大器中，輸入信號 V_{in} 被施加於反相輸入腳 66 而一參考電壓 V_{ref} 被施加於非反轉腳 68；在反相和非反相輸入的電壓上沒有差異的靜止工作情況下，由於相同的 p-MOSFET 驅動器 72、74，具有一共同閘極電壓 V_{b1} 的 p-MOS 階接 76、78 及包含具相同 n 型電晶體 80、82 的一個 n-MOSFET 電流鏡之威爾生負載，而來自電流源 70 之偏壓電流 I_{b1} 被平分於兩腳之間。

將比靜止情形大幅更負的一輸入電壓施加於反相端子引起 p-MOSFET 驅動器 74 更強壯地導通；因此放大器變得不平衡而比通過非反相腳 68 更多的偏壓電流流過反相腳 66；在直接的響應上，威爾生負載（FET 80 和 82）藉由減小閘

（請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁）

裝

訂

五、發明說明 (12)

極至源極電壓並因此增大 n-MOSFET 威爾生負載之 r_d 來反應；此引起輸出電壓 V_o 。在相反於輸入信號之者的一正性方向上搖擺；如果使用相同的 MOSFET 造形則階接 CMOS 差分放大器之開迴路增益本質上相同於階接 CMOS 反相器之者。

如在第 7 圖中所示，一成像陣列 90 較佳以一混成結構製成；一光檢測層 92 使用分子束延生而在例如一透明檢測器基體 94 上成長以界定一陣列之光二極體 10；用於各光二極體的介面電路較佳使用具一薄氧化層的高品質延生或中子變質摻雜晶圓而製成以提供適當的臨界電壓 V_t 均勻度；光檢測層 92 係使用一陣列之鋼塊 98 而安裝在矽層 96 上的倒裝片以將光二極體 10 連接於對個別的介面電路 17。

具接近零的通量位準的一連續照射圖型 100 穿透被光二極體陣列分段取樣的檢測器基體 94；各光二極體 10 在各取樣期間中產生正比於入射在該像素區的光子之數目的一檢測器電流；檢測器電流 I_{det} 通過鋼塊 98 被連通至它們被放大和取樣的個別介面電路 17；例如，在各取樣時間產生的斷續信號一起界定一視訊信號之一訊框。

當本發明之數個說明性實施例已被顯示和描述時，那些熟知該技藝者可做出許多變化和替換實施例；如此變化和替換實施例被思考，並可被做而不偏離如在所附申請專利範圍中界定的本發明之精神和範疇。

元件編號對照表

10 光檢測器	38 增益 FET 之閘極
12 負載 FET	40、50 電容器

五、發明說明 (13)

- | | |
|-------------------|-----------------------|
| 14 增益 FET | 42、52、54 FET 切換器 |
| 16 放大器 | 56、58 閘極 |
| 17 介面電路 | 60、72、74 p-MOSFET 驅動器 |
| 18 陽極 | 62、80、82 n-MOSFET 元件 |
| 20 陰極 | 64、76、78 p-MOSFET 元件 |
| 22 負載 FET 之汲極 | 66 反相輸入腳 |
| 24 負載 FET 之源極 | 68 非反相輸入腳 |
| 25 放大器輸入 | 70 電流源 |
| 26 放大器輸出 | 90 成像陣列 |
| 27 負載 FET 之閘極 | 92 光檢測層 |
| 28 增益 FET 之汲極 | 94 基體 |
| 30 增益 FET 之源極 | 96 矽層 |
| 32 光二極體之響應曲線 | 98 錫塊 |
| 34、44 負載 FET 之負載線 | 100 照射圖型 |
| 36、46 增益 FET 之負載線 | |

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

線

四、中文發明摘要 (發明之名稱：用於對光檢測器作單一光子讀出動作之超低雜訊高帶寬介面電路)

本案提出用於以視訊訊框率對從 x 射線 至長 IR 帶的已知光檢測器作單一光子讀出的一種超低雜訊高增益介面電路；檢測器電流調變一負載 FET 之閘極至源極電壓，其再調變一增益 FET 之閘極至源極電壓，而產生為該檢測器電流之一經放大複本的一信號電流；負載 FET 之閘極至源極電壓被連接在一低雜訊高增益放大器之負回授迴路中；此有效地依該放大器之增益使光檢測器所見的電阻減小，因而使介面電路之 RC 時間常數減小相同量；因為放大器針對一給定通量位準插連負載 FET 之閘極電壓，故負載 FET 之 $1/f$ 雜訊被傳送至放大器，因而致能單一光子讀出敏感度。

英文發明摘要 (發明之名稱：ULTRA-LOW NOISE HIGH BANDWIDTH INTERFACE CIRCUIT FOR SINGLE-PHOTON READOUT OF PHOTODETECTORS)

An ultra-low noise, high gain interface circuit for single-photon readout of known photodetectors from the x-ray to long IR bands at video frame rates. The detector current modulates a load FET's gate-to-source voltage, which in turn modulates the gate-to-source voltage of a gain FET thereby producing a signal current that is an amplified facsimile of the detector current. The load FET's gate-to-source voltage is connected in the negative feedback loop of a low noise, high gain amplifier. This effectively reduces the resistance seen by the photodetector by the gain of the amplifier thereby reducing the interface circuit's RC time constant by the same amount. Because the amplifier pins the load FET's gate voltage for a given flux level, the load FET's $1/f$ noise is transferred to the amplifier thereby enabling single-photon readout sensitivity.

六、申請專利範圍

1. 一種單一光子讀出電路，其包含有：

一光檢測器，其響應於入射光子而產生一小信號檢測器電流；

一電流鏡，其具有展現 $1/f$ 雜訊的一負載場效電晶體(FET)和一增益FET，該小信號檢測器電流調變該負載FET之閘極至源極電壓，後者則調變該增益FET之閘極至源極電壓，使得該增益FET導通為該小信號檢測器電流之一放大複本的一信號電流，該光檢測器具有一電容量且該負載FET具有一互導 g_{load} ，它們一起界定限制該電路之帶寬的一個RC時間常數；及

一放大器，其被連接在繞著該負載FET之閘極至源極電壓的一負回授迴路中，該放大器將該負載FET對檢測電流上的改變之響應時間減小，使得RC時間常數除以放大器之增益因而擴大該電路之帶寬，該放大器對於一給定檢測器電流也插連該負載FET之閘極電壓，使得否則將導出在增益FET之調變上的一些抖動量的負載FET之 $1/f$ 雜訊被傳送至該放大器。

2. 依據申請專利範圍第1項之讀出電路，其中該增益FET有一互導 g_{gain} ，該等負載和增益FET共用一共同閘極，使得該電流鏡之增益由它們的互導之比率設定。

3. 依據申請專利範圍第2項之讀出電路，其中該負載FET在它的閘極至源極電壓為檢測器電流之一對數函數的它的次臨界區中操作，而該增益FET在該信號電流為它的閘極至源極電壓之平方之一函數的飽和狀態下操

六、申請專利範圍

作，使得互導比率，以及因此電流鏡之增益，隨在檢測器電流上的改變對數地變化。

4. 依據申請專利範圍第3項之讀出電路，其中該等FET係具有個別汲極和源極的N通道元件，該負載FET之汲極被連接至該光檢測器而它的源極被連接至反向偏壓該光檢測器的一第一偏壓電壓，該增益FET之汲極被連接至在其上提供有該信號電流的一輸出端子，而它的源極被連接至設定它的公稱閘極至源極電壓的一第二偏壓電壓，使得該增益FET之互導大於負載FET之互導。

5. 依據申請專利範圍第1項之讀出電路，其中該增益FET有一互導 g_{gain} ，且它的閘極被連接至該負載FET之源極，該讀出電路更包含有：

一負載電阻器，其與該負載FET之源極串聯連接；及

一增益電阻器，其與該增益FET之源極串聯連接，該等負載和增益電阻器之阻值 R_L 和 R_G 分別支配負載和增益FET之互阻抗 ($1/g_{load}$) 和 ($1/g_{gain}$)，使得該電流鏡之增益由該負載對該等增益FET阻值之比率所設定並大致與該小信號檢測器電流無關。

6. 依據申請專利範圍第5項之讀出電路，其中該等負載和增益電阻器中之至少一個係一可變電阻器。

7. 依據申請專利範圍第6項之讀出電路，其中該可變電阻器包含一切換的電容器。

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

六、申請專利範圍

8. 依據申請專利範圍第 1 項之讀出電路，其中當入射光子之數目被減少趨向零時，該放大器之負回授迴路慢下來達至被電流鏡設定的該 RC 時間常數以維持穩定化，且隨著光子數目增加，該放大器恢復並加速該回授迴路以增大該電路之帶寬。
9. 依據申請專利範圍第 1 項之讀出電路，其更包含：
 - 一 取樣電路，其以一取樣頻率 f_s 取樣該信號電流，該取樣頻率 f_s 超過該電流鏡由其 RC 時間常數界定的帶寬但小於由該電流鏡之 RC 時間常數所界定而被該放大器之增益定尺度的該電路之擴大的帶寬，使得經取樣之信號電流正確地追隨該小信號檢測器電流。
10. 依據申請專利範圍第 9 項之讀出電路，其中該取樣電路包含有：
 - 一 電容器，其取該信號電流之積分以界定一信號電壓；
 - 一 取用切換器，其以該取樣頻率 f_s 定時鐘以讀取該信號電壓；及
 - 一 重置切換器，其被定時鐘以在該信號電壓被讀取後令該電容器放電。
11. 依據申請專利範圍第 1 項之讀出電路，其中該光檢測器將各入射光子轉換成一單一電子，使得整個該增益由該電流鏡提供。
12. 一種單一光子讀出電路，其包含有：
 - 一反向偏壓光檢測器，其響應於各入射光子而導

六、申請專利範圍

通一單一電子以產生一小信號檢測器電流，該光檢測器有一特性電容量；

具有 $1/f$ 雜訊的一負載場效電晶體 (FET)，其自我調整其閘極至源極電壓以導通該光檢測器之小信號檢測器電流，該 FET 操作在它的閘極至源極電壓為該檢測器電流之一對數函數並界定一互導 g_{load} 之它的次臨界區中，該光檢測器之電容量和該負載 FET 之互導一起界定限制該電路之帶寬的一個 RC 時間常數；

一放大器，其被連接在繞著該負載 FET 之閘極至源極電壓的一負回授迴路中，其中當入射光子之數目趨近零時，該放大器之負回授迴路慢下來趨向由該 RC 時間常數設定的帶寬以維持一穩定閘極電壓，且隨著光子數目增加，該放大器之負回授迴路加速以用該放大器之增益除該 RC 時間常數並擴大該電路之帶寬，該放大器對於一給定檢測器電流也插連該負載 FET 之閘極電壓，使得該負載 FET 之 $1/f$ 雜訊被傳送至該放大器；

一增益 FET，具有被該負載 FET 之閘極電壓調變的一閘極、一汲極、及被偏壓以界定一互導 g_{gain} 並以飽和狀態操作該增益 FET 的一源極，該增益 FET 在飽和狀態下之汲極電流為其之經調變閘極至源極電壓之平方的一個函數，該汲極電流以由隨檢測器電流對數地變化的比例 g_{gain}/g_{load} 設定的增益提供該小信號檢測器電流之一放大的複本；及

一取樣電路，其以一取樣頻率 f_s 取樣該汲極電流

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

六、申請專利範圍

，該取樣頻率 f_s 超過由該 RC 時間常數界定的帶寬但小於該電路之經擴大帶寬，使得經取樣信號電流正確地追隨該小信號檢測器電流。

13. 依據申請專利範圍第 12 項之讀出電路，其中該取樣電路包含有：

一電容器，其取該信號電流之積分以界定一信號電壓；

一取用切換器，其以該取樣頻率 f_s 定時鐘以讀取該信號電壓；及

一重置切換器，其被定時鐘以在該信號電壓被讀取後令該電容器放電。

14. 依據申請專利範圍第 12 項之讀出電路，其中該等 FET 係具有個別汲極和源極並共用一共同閘極的 N 通道元件，該負載 FET 之汲極被連接至該光檢測器而它的源極被連接至反向偏壓該光檢測器的一第一偏壓電壓。

15. 一種單一光子讀出電路，其包含有：

一反向偏壓光檢測器，其響應於各入射光子而導通一單一電子以產生一小信號檢測器電流，該光檢測器有一特性電容量；

具有 $1/f$ 雜訊的一負載場效電晶體 (FET)，其自我調整其閘極至源極電壓以導通該光檢測器之小信號檢測器電流，該 FET 操作在它的閘極至源極電壓為該檢測器電流之一對數函數並界定一互導 g_{load} 之它的次臨界區中，該光檢測器之電容量和該負載 FET 之互導

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

六、申請專利範圍

一起界定限制該電路之帶寬的一個RC時間常數；

一負載電阻器，其被連接至該負載FET之源極並傳導該檢測器電流，該負載電阻器之阻值 R_1 支配該負載FET之互阻抗($1/g_{load}$)以使它的響應線性化；

一放大器，其被連接在繞著該負載FET之閘極至源極電壓的一負回授迴路中，其中當入射光子之數目趨近零時，該放大器之負回授迴路慢下來趨向由該RC時間常數設定的帶寬以維持一穩定閘極電壓，且隨著光子數目增加，該放大器之負回授迴路加速以用該放大器之增益除該RC時間常數並擴大該電路之帶寬，該放大器也插連該負載FET之閘極電壓，使得該負載FET之 $1/f$ 雜訊被傳送至該放大器且該檢測器電流調變該FET之源極電壓；

一增益FET，具有被在該負載電阻器一端之該負載FET之閘極電壓調變的一閘極、一汲極、及被偏壓以界定一互導 g_{gain} 並以飽和狀態操作該增益FET的一源極，該增益FET在飽和狀態下之汲極電流為其經調變閘極至源極電壓之平方的一個函數，該汲極電流提供該小信號檢測器電流之一放大的複本；

一增益電阻器，其與增益FET之源極連接並導通該信號電流，該增益電阻器之阻值 R_g 支配該增益FET之互阻抗($1/g_{gain}$)以使其響應線性化，使得該電路之增益由獨立於檢測器電流之比率 R_1/R_g 所設定；以及

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

裝

訂

六、申請專利範圍

一取樣電路，其以一取樣頻率 f_s 取樣該汲極電流，該取樣頻率 f_s 超過由該RC時間常數界定的帶寬但小於該電路之經擴大帶寬，使得經取樣信號電流正確地追隨該小信號檢測器電流。

16. 依據申請專利範圍第15項之讀出電路，其中該等負載和增益電阻器中之至少一個係一可變電阻器。
17. 依據申請專利範圍第16項之讀出電路，其中該可變電阻器包含一切換的電容器。
18. 依據申請專利範圍第15項之讀出電路，其中該取樣電路包含有：

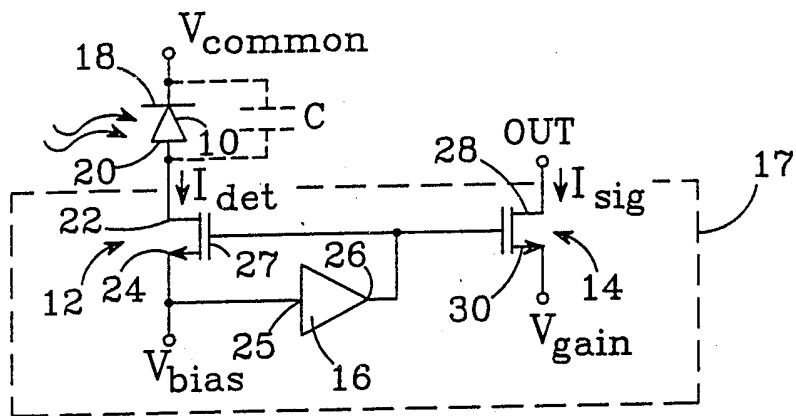
一電容器，其取該信號電流之積分以界定一信號電壓；

一取用切換器，其以該取樣頻率 f_s 定時鐘以讀取該信號電壓；及

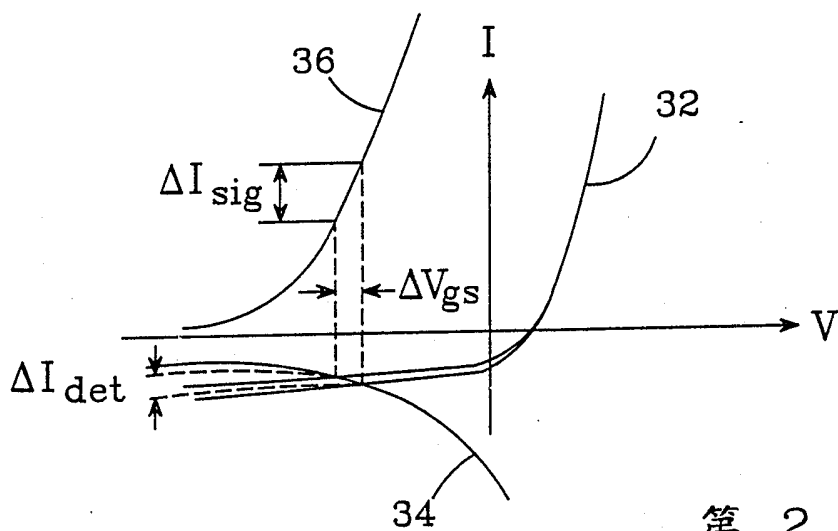
一重置切換器，其被定時鐘以在該信號電壓被讀取後令該電容器放電。

(請先閱讀背面之注意事項再填寫本頁)

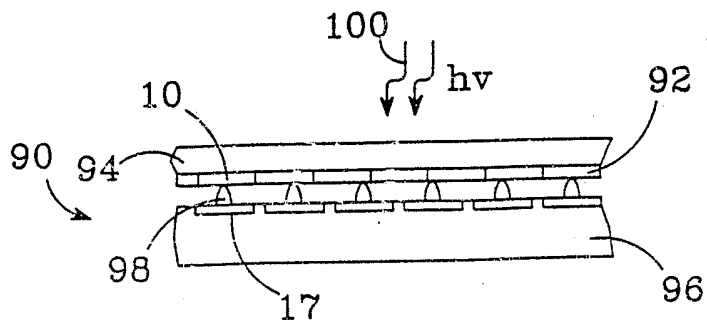
訂



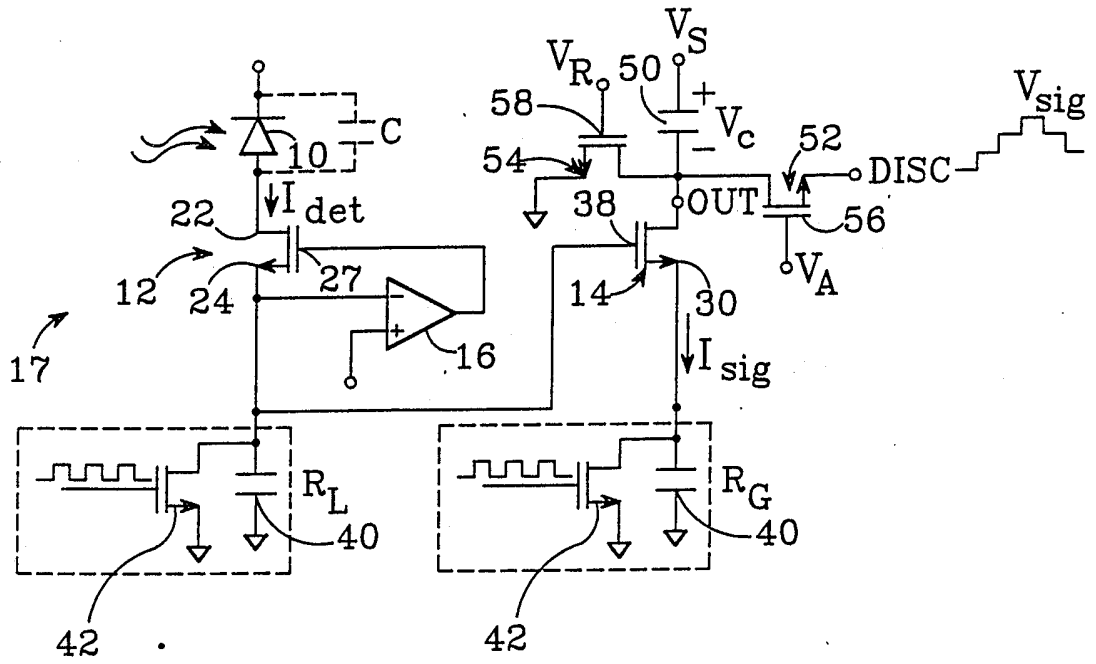
第 1 圖



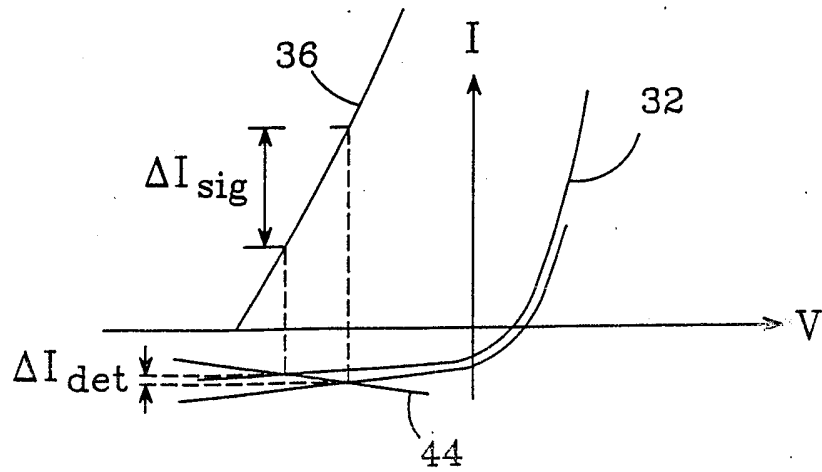
第 2 圖



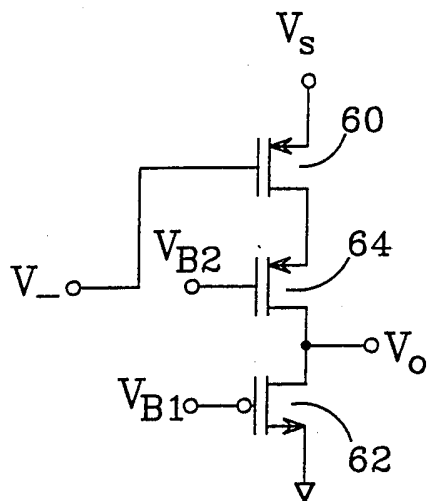
第 7 圖



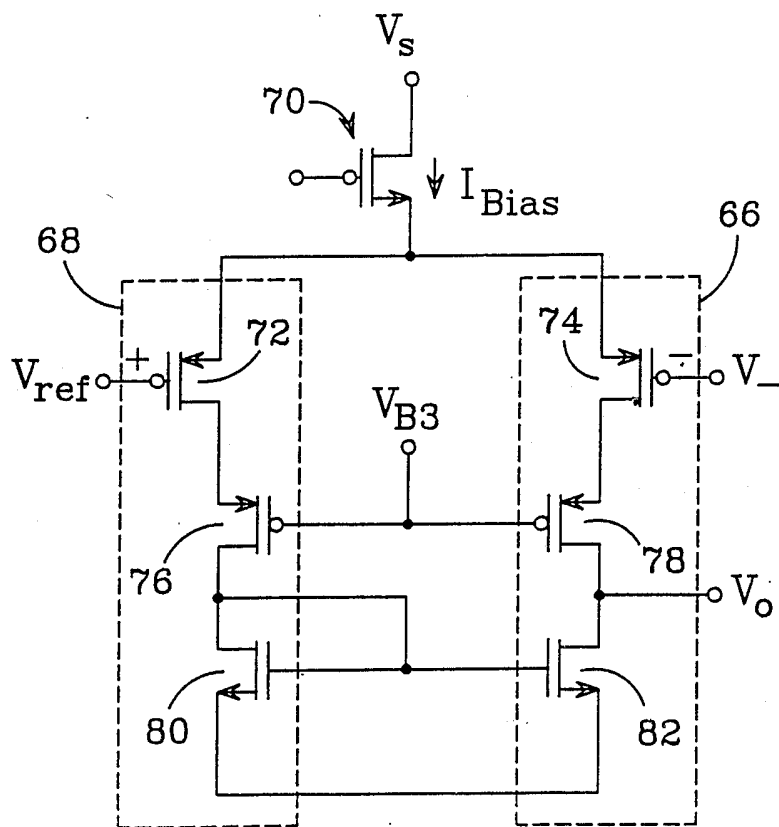
第 3 圖



第 4 圖



第 5 圖



第 6 圖