

## **DESCRIZIONE**

Della Domanda di Brevetto per Invenzione Industriale dal titolo:

“Rivelatore a singolo fotone ad area larga con funzionalità di time-gating”

a nome : 1) POLITECNICO DI MILANO

2) MICRO PHOTON DEVICES S.r.l.

con sede in : 1) MILANO (Italia) e 2) Bolzano (Italia)

inventori : TOSI Alberto, VILLA Federica Alberta, ZAPPA Franco, TORRICELLI Alessandro, DALLA MORA Alberto, CONTINI Davide, PIFFERI Antonio Giovanni, TARONI Paola, DI SIENO Laura, BUTTAFAVA Mauro, CONCA Enrico, SCROFANI Gabriele, TISA Simone

\* \* \* \* \*

## **DESCRIZIONE**

### **Settore tecnico**

La presente invenzione riguarda il settore dei fotorivelatori, in particolare rivelatori a singolo fotone a stato solido, e ancora più in particolare rivelatori a singolo fotone aventi funzionalità di time-gating e un'area fotosensibile larga.

### **Stato dell'arte**

L'ottica diffusiva è lo studio della propagazione di fotoni in materiali altamente diffusivi.

Tra le applicazioni dell'ottica diffusiva, la spettroscopia nel vicino infrarosso (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) è utilizzata per stimare la composizione e microstruttura di tessuti biologici e altri materiali altamente diffusivi, fino ad una profondità di alcuni centimetri, stimando le proprietà di assorbimento ottico e diffusione ottica del campione. La stima può essere eseguita tramite NIRS, per mezzo di un'eccitazione luminosa ad onda continua (CW-NIRS), o impulsata (NIRS nel dominio del tempo o risolta nel tempo, TD-NIRS), o modulata ad onda sinusoidale (NIRS nel dominio della frequenza o risolta in frequenza, FD-NIRS).

La NIRS può essere utilizzata per l'imaging funzionale del cervello, il monitoraggio dell'ossigenazione di muscoli, individuazione di un cancro, la valutazione della qualità della frutta e per molte altre applicazioni. Tra le tecniche NIRS, la TD-NIRS fornisce maggior contenuto di informazione,

sensibilità, penetrazione nel mezzo e insensibilità ad artefatti di movimento. Secondo la TD-NIRS, impulsi di luce laser sono iniettati nel campione in esame (per esempio usando fibre ottiche) e la luce ri-emessa dal campione è raccolta da un fotorivelatore (nella presente descrizione i termini “fotorivelatore” e “rivelatore” saranno usati in modo interscambiabile) con sensibilità al singolo fotone. Per massimizzare la raccolta di luce dal campione, il fotorivelatore deve avere un’area sensibile sufficientemente larga (per esempio maggiore di  $1 \text{ mm}^2$ ).

La TD-NIRS può trarre vantaggio dalla così detta tecnica di “acquisizione time-gated veloce”, combinata con una piccola distanza tra il punto dove i fotoni colpiscono il mezzo (ossia, punto sorgente o di iniezione) ed il punto dove i fotoni retro-diffusi sono raccolti (ossia, punto di raccolta o rivelatore) sul campione in esame. L’approccio a “time-gated veloce” consiste nell’accendere “ON” (i fotoni possono essere rivelati) e spegnere “OFF” (nessun fotone può essere rivelato) molto velocemente il fotorivelatore in modo da selezionare solo i fotoni utili dalla luce riemessa, ossia abilitare la rivelazione solo durante intervalli di tempo ben definiti (quando è previsto che arrivino i fotoni utili). Un approccio a “time-gating veloce”, in particolare, consiste nel commutare il fotorivelatore tra lo stato OFF e lo stato ON con tempi di transizione inferiori al nanosecondo, più probabilmente nell’intervallo di poche centinaia di picosecondi. Questo migliora il range dinamico di misura di diversi ordini di grandezza, scartando l’intenso impulso di fotoni in arrivo all’inizio rispetto a quelli che ritornano da strati più profondi del mezzo. Infatti, questi fotoni che arrivano inizialmente forniscono solo informazioni che riguardano gli strati superficiali ed esterni del campione in esame (siccome hanno viaggiato solo attraverso tessuti superficiali) e ancor peggio essi possono saturare (o in alcuni casi anche danneggiare) il rivelatore.

In anni recenti, un interesse crescente è rivolto alla Single-photon Light Detection and Ranging (LiDAR). La tecnica LiDAR è tipicamente utilizzata per ricostruire una mappa spaziale di oggetti attorno ad una posizione, misurando il tempo di volo di impulsi di luce emessi da un laser, riflessi indietro da un oggetto, e rivelati da un rivelatore a singolo fotone. Una mappa

3D dello spazio circostante è ricostruita o scansionando la scena con una sorgente di fotoni e un rivelatore puntiformi o illuminando a flash la scena e acquisendo i fotoni di ritorno attraverso rivelatori di immagini (o attraverso una combinazione di array di rivelatori, laser e scanner). Nuovamente, il rivelatore a singolo fotone può utilizzare una tecnica di “time-gating veloce” per selezionare solo i fotoni riflessi da oggetti all’interno di un intervallo di profondità ben definito (ossia, all’interno di una finestra time-gated), evitando quindi rivelazioni non volute da altri oggetti fuori dalla regione di interesse (per esempio di fronte a, o dietro gli oggetti in esame), limitando quindi i fotoni di fondo. La sorgente laser e il rivelatore possono essere o lungo la linea di vista verso l’oggetto o nascosti da altri ostacoli in una configurazione non in linea di vista (per esempio dietro un angolo). La tecnica LiDAR può essere usata nel campo dell’automotive (per esempio, sistemi di assistenza alla guida avanzati – Advanced Driver-Assistance Systems, ADAS, auto a guida autonoma), per l’industria dell’automazione, per interazione senza contatto (per esempio nel gioco, con dispositivi multimediali elettronici), ecc.

I diodi a valanga a singolo fotone (Single-Photon Avalanche Diodes, SPADs) sono rivelatori a stato solido a singolo fotone che possono essere utilizzati sia in applicazioni di ottica diffusiva, in particolare per funzionamento a time-gated veloce, che anche in applicazioni di imaging a tempo di volo, così come in molte altre applicazioni. Come noto, uno SPAD è una giunzione p-n polarizzata inversamente sopra la tensione di rottura (tensione di breakdown), lavorando nel così detto “regime di Geiger”. Un singolo fotone incidente sull’area otticamente attiva (o, semplicemente, attiva o fotosensibile) dello SPAD può generare una coppia di portatori (elettrone e lacuna) capaci di innescare un processo di moltiplicazione di carica a valanga (avalanche), determinando un impulso di corrente a valanga macroscopico, che segna il tempo di arrivo di quel fotone. Quando usato in modalità time-gated veloce, la tensione di polarizzazione dello SPAD può essere tenuta sotto il valore di breakdown in corrispondenza dell’arrivo di fotoni non voluti (per esempio fotoni iniziali uscenti dagli strati esterni del campione in esame o fotoni riflessi da oggetti vicini alla sorgente di luce), e

quindi rapidamente portata sopra il valore di breakdown per rivelare il segnale desiderato (per esempio fotoni più ritardati che escono dagli strati più profondi del campione o fotoni riflessi da oggetti distanti).

Nel documento “Fast-Gated Single-Photon Avalanche Diode for Wide Dynamic Range Near Infrared Spectroscopy” di A. Dalla Mora et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 16, no.4, Luglio/Agosto 2010, pagine 1023-1030, è descritto un singolo dispositivo SPAD per l'uso in funzionamento fast-gating che mostra tempi di transizione inferiori a 200 ps.

Un fotomoltiplicatore in Silicio (Silicon PhotoMultiplier, SiPM) consiste di array di centinaia o migliaia di microcelle, ciascuna comprendente uno SPAD e la sua resistenza di spegnimento (quenching), e mostra un'area attiva larga (fino a pochi mm<sup>2</sup>). Il documento “Fast silicon photomultiplier improves signal harvesting and reduces complexity in time-domain diffuse optics” di A. Dalla Mora et al., Opt. Express, vol. 23, no.11, pagine 13937-13946, 2015, descrive una sonda nel dominio del tempo per ottica diffusiva che utilizza un SiPM.

### **Riassunto dell'invenzione**

Gli inventori hanno notato che il rivelatore descritto nel documento “Fast-Gated Single-Photon Avalanche Diode for Wide Dynamic Range Near Infrared Spectroscopy” citato sopra ha un'area attiva piccola (circa 100 µm di diametro), che limita fortemente la raccolta di luce dal campione.

D'altra parte, i SiPM possono avere un'area attiva larga, come discusso nel documento “Fast silicon photomultiplier improves signal harvesting and reduces complexity in time-domain diffuse optics” citato sopra, ma non sono adatti per funzionalità a time-gating veloce, a causa della loro alta capacità parassita e della presenza del resistore di spegnimento integrato, entrambi che impediscono transizioni rapide della loro tensione di polarizzazione, necessarie per accendere rapidamente il rivelatore.

Alla luce di quanto sopra, un oggetto della presente invenzione è fornire un fotorivelatore, in particolare un fotorivelatore a stato solido, che presenta sensibilità a singolo fotone, area fotosensibile larga e funzionalità a time-

gating veloce.

Nella seguente descrizione e nelle rivendicazioni, l'aggettivo "attivo" e "fotosensibile" saranno utilizzati in modo intercambiabile.

Nella seguente descrizione e nelle rivendicazioni, il termine "microcella" indicherà un singolo elemento di rivelazione di un rivelatore ad array come un SiPM o un sensore di immagine basato su SPAD.

Inoltre, l'espressione "regime di singolo fotone" del fotorivelatore indicherà che, in media su multipli impulsi laser di eccitazione, non più di un fotone raggiunge il fotorivelatore per ciascun periodo di eccitazione del laser.

Secondo un aspetto, la presente invenzione fornisce un fotorivelatore comprendente:

- un array di microcelle;
- un modulo di output configurato per raccogliere da ciascuna microcella un segnale di output che indica una rivelazione di fotone e combinare i segnali di output raccolti in almeno una linea di output,

in cui ciascuna microcella comprende:

- un primo dispositivo e un secondo dispositivo, in cui almeno uno tra il primo dispositivo e il secondo dispositivo è un dispositivo fotosensibile in grado di rivelare il fotone;
- un modulo di time-gating connesso all'almeno un dispositivo fotosensibile e configurato per fornire un segnale di gate all'almeno un dispositivo fotosensibile per attivare l'almeno un dispositivo fotosensibile; e
- un modulo di lettura configurato per ricevere, all'arrivo del fotone sull'almeno un dispositivo fotosensibile attivato, un corrispondente segnale dall'almeno un dispositivo fotosensibile attivato e, in base al segnale ricevuto, fornire un segnale di output al modulo di output.

Secondo forme di realizzazione preferite della presente invenzione, sia il primo dispositivo che il secondo dispositivo sono dispositivi fotosensibili.

Preferibilmente, sia il primo dispositivo che il secondo dispositivo sono diodi a valanga a singolo fotone.

Preferibilmente, il fotorivelatore comprende inoltre un modulo di frontend connesso al modulo di lettura e configurato per gestire l'almeno un dispositivo fotosensibile e interfacciarlo con il modulo di lettura. In particolare, secondo le forme di realizzazione preferite dell'invenzione, il modulo di frontend comprende un circuito di spegnimento della valanga e una logica di gestione del tempo di recupero (hold-off).

Secondo prime forme di realizzazione preferite della presente invenzione il modulo di time-gating è connesso al catodo sia del primo dispositivo fotosensibile che del secondo dispositivo fotosensibile, e il modulo di lettura è connesso all'anodo sia del primo dispositivo fotosensibile che del secondo dispositivo fotosensibile.

Secondo seconde forme di realizzazione preferite della presente invenzione, sia il modulo di time-gating che il modulo di lettura sono connessi all'anodo sia del primo dispositivo fotosensibile che del secondo dispositivo fotosensibile.

Preferibilmente, il modulo di time-gating è configurato per attivare l'almeno un dispositivo fotosensibile per mezzo di un segnale di gate comprendente una sequenza di impulsi, avendo ciascun impulso una durata predeterminata durante la quale l'almeno un dispositivo fotosensibile è acceso.

Secondo forme di realizzazione preferite dell'invenzione, il modulo di time-gating è configurato per applicare uno stesso segnale di gate al primo dispositivo fotosensibile e al secondo dispositivo fotosensibile.

In particolare, quando i dispositivi fotosensibili sono SPAD, il modulo di time-gating è configurato per usare il segnale di gate per modulare una tensione di polarizzazione inversa sul primo dispositivo fotosensibile e su detto secondo dispositivo fotosensibile da sotto a sopra una loro tensione di breakdown.

Secondo forme di realizzazione preferite dell'invenzione, il modulo di lettura è un circuito di lettura differenziale configurato per rivelare una variazione di corrente/tensione nel primo dispositivo o nel secondo dispositivo causata dalla rivelazione del fotone e fornire un segnale di output indicativo della rivelazione.

Preferibilmente, il modulo di lettura comprende un primo comparatore, un secondo comparatore e una porta OR connessa all'output sia del primo comparatore che del secondo comparatore; ciascun comparatore è configurato per determinare se una tensione in corrispondenza dell'anodo di un rispettivo dispositivo fotosensibile è maggiore di una tensione in corrispondenza dell'anodo dell'altro dispositivo fotosensibile di una soglia predefinita, e la porta OR è configurata per fornire il segnale di output che indica la rivelazione da parte di uno qualsiasi tra il primo dispositivo fotosensibile ed il secondo dispositivo fotosensibile.

In alternativa, il modulo di lettura comprende una porta XOR avente due input, ciascuno connesso ad un anodo di un rispettivo dispositivo tra il primo dispositivo fotosensibile ed il secondo dispositivo fotosensibile; la porta XOR è configurata per determinare se una tensione in corrispondenza dell'anodo di uno qualunque tra il primo dispositivo fotosensibile e il secondo dispositivo fotosensibile è maggiore di una soglia predeterminata e fornire un segnale di output che indica la rivelazione da parte di uno qualsiasi tra il primo dispositivo fotosensibile ed il secondo dispositivo fotosensibile.

Vantaggiosamente, ciascuna microcella è configurata per ricevere un rispettivo segnale di abilitazione, per abilitare o disabilitare la microcella.

Più in particolare, uno stesso segnale può essere usato per abilitare o disabilitare un insieme di microcelle.

Preferibilmente, il modulo di output comprende rami di albero ad H completamente logici (fully-logic H-tree branches).

Preferibilmente, una sua area attiva totale è uguale ad almeno  $0,5 \text{ mm}^2$ .

Secondo forme di realizzazione vantaggiose della presente invenzione, il fotorivelatore comprende un numero di microcelle con aree attive di dimensioni diverse.

### **Breve descrizione dei disegni**

La presente invenzione diverrà più chiara dalla seguente descrizione dettagliata, fornita a titolo di esempio e non di limitazione, da leggersi con riferimento alle figure allegate, in cui:

- la Figura 1 mostra uno schema a blocchi di un fotorivelatore e uno

- schema a blocchi dettagliato di una microcella del fotorivelatore, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione;
- le Figure 2a, 2b e 2c mostrano schemi a blocchi di possibili implementazioni di una microcella del fotorivelatore, secondo forme di realizzazione alternative della presente invenzione;
  - le Figure 3a e 3b mostrano schemi a blocchi di possibili implementazioni del modulo di lettura di una microcella del fotorivelatore, secondo forme di realizzazione alternative della presente invenzione;
  - la Figura 4 mostra forme d'onda di tensione esemplificative del modulo di lettura di Figura 3b;
  - la Figura 5a mostra uno schema circuitale di una possibile implementazione di un modulo di time-gating e un modulo di frontend, secondo una forma di realizzazione della presente invenzione;
  - la Figura 5b mostra forme d'onda esemplificative di segnali usati nello schema di Figura 5a;
  - la Figura 5c mostra ulteriori dettagli dei circuiti di Figura 5a;
  - la Figura 6 mostra schematicamente una possibile implementazione di un modulo di output del fotorivelatore;
  - la Figura 7 mostra una porzione di un fotorivelatore con microcelle aventi aree attive di dimensione diverse; e
  - le Figure 8a e 8b mostrano simulazioni numeriche della funzione di attenuazione di segnale per due fotorivelatori (Figura 8a per un fotorivelatore con microcelle di dimensioni diverse e Figura 8b per un fotorivelatore con microcelle della stessa dimensione, rispettivamente), secondo la presente invenzione.

**Descrizione dettagliata di forme di realizzazione preferite  
dell'invenzione**

La Figura 1 mostra schematicamente un fotorivelatore 1 secondo una forma di realizzazione della presente invenzione. La Figura 1 mostra anche una vista ingrandita di una microcella 11 del fotorivelatore 1 secondo una sua possibile implementazione.

Secondo la presente invenzione, il fotorivelatore 1 è un fotorivelatore a

stato solido che può essere fabbricato su uno o più substrati di semiconduttore usando una qualsiasi delle tecnologie di microelettronica attualmente disponibili, come qualsiasi lavorazione CMOS o BCD standard o personalizzata in silicio, e/o SiGe, e/o semiconduttori III-V, o una ricetta completamente personalizzata, sia fabbricato monoliticamente o anche usando l'impilamento 3D (3D stacking) (per esempio collegamento wafer-to-wafer, collegamento chip-to-chip, o assemblaggio system-on-chip) o una loro molteplicità.

Il fotorivelatore 1 preferibilmente comprende un array bidimensionale di  $M \times N$  microcelle 11, dove M e N sono numeri interi  $\geq 1$ . Nel fotorivelatore 1 secondo la presente invenzione, le microcelle 11 sono disposte l'una accanto all'altra secondo una geometria predefinita e dimensioni predefinite, che dipendono dall'applicazione, e sono disposte per formare un chip del sensore. Un'area attiva totale dell'array di microcelle 11 è calcolata come la somma delle aree attive di dispositivi fotosensibili compresi nel fotorivelatore 1, come verrà descritto nel seguito. Nel fotorivelatore 1 secondo la presente invenzione, l'area attiva totale dell'array di microcelle 11 è uguale almeno a  $0,5 \text{ mm}^2$ , preferibilmente di qualche millimetro quadrato. Ciascuna microcella 11 ha preferibilmente un'area otticamente attiva nell'intervallo da pochi micrometri quadri a poche migliaia di micrometri quadri, per esempio tra  $25 \mu\text{m}^2$  e  $10000 \mu\text{m}^2$ .

Il fotorivelatore 1 preferibilmente comprende inoltre un modulo di output 12 connesso a ciascuna microcella 11. Il modulo di output 12 preferibilmente comprende almeno una linea di output 13.

Preferibilmente, una microcella 11 comprende un primo dispositivo 111 e un secondo dispositivo 112. Il primo dispositivo 111 è un dispositivo fotosensibile (ossia, un dispositivo che è capace di rivelare fotoni) ed è configurato per rivelare fotoni incidenti su una sua area attiva. Il dispositivo fotosensibile è preferibilmente un fotorivelatore a stato solido a singolo fotone, più preferibilmente un diodo a singolo fotone a valanga (SPAD) 111. Il dispositivo fotosensibile 111 può essere fabbricato usando un materiale semiconduttore come, ad esempio, silicio, InGaAs/InP, germanio.

Il secondo dispositivo 112 può essere un ulteriore dispositivo fotosensibile o, in alternativa, un dispositivo cieco (ossia un dispositivo che non è capace di rivelare fotoni), che mostra capacità parassite, induttanza e/o resistenza simili al primo dispositivo 111.

Secondo forme di realizzazione preferite della presente invenzione, il secondo dispositivo 112 è un altro dispositivo fotosensibile uguale al primo dispositivo 111 e, più preferibilmente, un ulteriore SPAD. Vantaggiosamente, questo permette di non sprecare l'area del semiconduttore e quindi di aumentare il fattore di riempimento (fill factor) raggiungibile, ossia il rapporto tra l'area fotosensibile del fotorivelatore (dove i fotoni possono essere rivelati) e l'area complessiva del fotorivelatore (che include anche le regioni dove sono posizionati i circuiti elettronici, come verrà descritto nel seguito).

Secondo forme di realizzazione alternative, il secondo dispositivo 112 è preferibilmente un dispositivo che è adatto a simulare il comportamento elettrico del primo dispositivo 111. Secondo queste forme di realizzazione, il secondo dispositivo 112 può essere, per esempio, un condensatore, una giunzione p-n, o un SPAD con una tensione di breakdown maggiore.

Secondo forme di realizzazione differenti della presente invenzione, ciascuna microcella 11 può contenere una coppia di un primo dispositivo 111 e un secondo dispositivo 112, o un insieme di coppie di tali dispositivi, ciascuna coppia comprendendo un primo dispositivo 111 e un secondo dispositivo 112.

Ciascuna microcella 11 preferibilmente comprende inoltre almeno un modulo di time-gating 113, almeno un modulo di frontend 114a e almeno un modulo di lettura 114b. Nella forma di realizzazione della presente invenzione mostrata in Figura 1, ciascuna microcella 11 comprende un modulo di time-gating 113, un modulo di frontend 114a e un modulo di lettura 114b per ciascuna coppia di un primo dispositivo 111 e un secondo dispositivo 112. Secondo altre forme di realizzazione, una microcella 11 può comprendere un modulo di time-gating per ciascun dispositivo. Secondo lo schema esemplificativo di Figura 1, in cui il dispositivo fotosensibile è mostrato nella forma di uno SPAD, il modulo di time-gating 113 è connesso

al catodo sia del primo dispositivo 111 che del secondo dispositivo 112, mentre i moduli di frontend e lettura 114a, 114b sono connessi all'anodo sia del primo dispositivo 111 che del secondo dispositivo 112. In una forma di realizzazione differente, il modulo di time-gating 113 è connesso all'anodo sia del primo dispositivo 111 che del secondo dispositivo 112, mentre i moduli di frontend e lettura 114a, 114b sono connessi al catodo sia del primo dispositivo 111 che del secondo dispositivo 112.

Il modulo di time-gating 113 è preferibilmente un circuito configurato per essere in grado di variare la sensibilità del(dei) dispositivo(i) fotosensibile(i), ossia di variare una modalità di funzionamento del(dei) dispositivo(i) fotosensibile(i) da una modalità OFF (fotoni incidenti sul dispositivo fotosensibile non sono rivelati) a una modalità ON (fotoni incidenti sul dispositivo fotosensibile sono rivelati). L'operazione di cambiare la modalità di funzionamento di un dispositivo fotosensibile da OFF a ON sarà indicata anche come "attivare il dispositivo". Questo può essere fatto modulando (per un SPAD, con una ampiezza di pochi volt) una tensione di polarizzazione inversa sul(sui) dispositivo(i) fotosensibile(i) da sotto a sopra una tensione di breakdown (che, per uno SPAD, è tipicamente di qualche decina di volt) in modo da spegnere (OFF) o accendere (ON) e viceversa il(i) dispositivo(i) fotosensibile(i), come sarà descritto in maggior dettaglio nel seguito. Secondo la presente invenzione, un segnale di gate in corrispondenza dell'input del modulo di time-gating 113 è usato per impostare ripetutamente la modalità di funzionamento del(dei) dispositivo(i) fotosensibile(i) alla modalità ON o alla modalità OFF. Il segnale di gate preferibilmente comprende una sequenza di impulsi aventi una durata predeterminata (nella seguente descrizione gli impulsi saranno indicati anche come "finestre di gate"). Nelle Figure, l'input del modulo di time-gating è rappresentato da una freccia entrante nel modulo di time-gating 113, con numero di riferimento impostato a 14. Il segnale di gate può essere ricevuto dal modulo di time-gating dall'esterno della microcella, attraverso un input dedicato, o può essere generato all'interno della microcella, impiegando un generatore di segnale di gate connesso al modulo di time-gating e basato su, per esempio,

celle a ritardo controllato in tensione. Vantaggiosamente, come sarà chiaro dalla seguente descrizione, il modulo di time-gating secondo la presente invenzione è in grado di raggiungere una così detta “modalità fast-gated” di funzionamento del fotorivelatore in quanto esso permette di spegnere e accendere (OFF/ON) e viceversa il(i) dispositivo(i) fotosensibile(i) con brevi tempi di transizione, ossia nell'ordine di 1 ns, più preferibilmente inferiori ai 500 ps.

Il modulo di frontend 114a comprende un insieme di circuiti ausiliari usati per gestire il dispositivo fotosensibile e interfacciarlo con il modulo di lettura 114b. Nel caso di uno SPAD, il modulo di frontend 114a può comprendere un circuito di spegnimento della valanga e una logica di gestione dell'hold-off, che può interfacciarsi con il modulo di time-gating 113.

Il modulo di lettura 114b è preferibilmente un circuito di lettura differenziale configurato per rilevare una variazione di corrente/tensione nel primo dispositivo 111 o nel secondo dispositivo 112 causata dalla rivelazione di un fotone, e per fornire, come suo output, un corrispondente segnale di output (per esempio un impulso di tensione) indicativo di detta rivelazione con una precisione temporale di poche decine di picosecondi, come verrà descritto in maggior dettaglio nel seguito. Nelle Figure, l'output del modulo di lettura 114b è rappresentato da una freccia uscente dal modulo di lettura 114b ed etichettato con il numero di riferimento 15. Vantaggiosamente, come sarà chiaro dalla seguente descrizione, il circuito di lettura differenziale è in grado di rigettare disturbi di modo comune (common-mode), ossia disturbi che possono agire sui segnali forniti sia dal primo che dal secondo dispositivo. Vantaggiosamente, il circuito di lettura differenziale è in grado di rigettare anche variazioni di tensione di modo comune e in particolare picchi di tensione spuri che possono disturbare la rivelazione di fotoni e che sono dovuti alla modulazione di tensione di polarizzazione, ossia alle transizioni rapide della tensione di polarizzazione durante il funzionamento nella modalità fast-gated sopra menzionata.

I circuiti elettronici di ciascuna microcella possono sia essere integrati nello stesso substrato contenente i dispositivi fotosensibili oppure possono

essere implementati su un secondo substrato separato connesso elettricamente e meccanicamente al primo substrato tramite note tecnologie microelettroniche di impilamento 3D.

Inoltre, ciascuna microcella 11 è preferibilmente configurata per ricevere un segnale di abilitazione per abilitare o disabilitare tale singola microcella. Quando la microcella è abilitata, può avere il gate impostato ON e OFF e può quindi rivelare i fotoni. L'abilitazione o disabilitazione di ciascuna microcella può essere ottenuta per una durata di tempo predefinita, e anche per un lungo periodo di tempo, tipicamente più lungo di 1 millisecondo. Il segnale di abilitazione può essere generato all'interno o all'esterno del fotorivelatore 1. All'interno del fotorivelatore 1, il segnale di abilitazione può essere generato all'interno o all'esterno di ciascuna microcella 11. Una possibile implementazione prevede l'aggiunta di un elemento di memoria per ciascuna microcella 11, l'elemento di memoria essendo preferibilmente un elemento di memoria di lettura-scrittura, il cui stato indica se la microcella 11 è abilitata o meno. Il tempo necessario per abilitare o disabilitare la microcella 11 è almeno di decine di nanosecondi e quindi è maggiore del periodo del segnale di gate.

Il segnale di abilitazione, quando inattivo, causa la disabilitazione della microcella, indipendentemente dal segnale di gate. Quando disabilitata, la microcella può restare disabilitata per un periodo di tempo indefinito, fino a quando non sarà possibilmente abilitata di nuovo.

Secondo la presente invenzione, il segnale di abilitazione può essere utilizzato per abilitare simultaneamente un insieme di microcelle all'interno del fotorivelatore. Le microcelle di tale insieme possono essere raggruppate spazialmente o distribuite in modo sparso lungo il fotorivelatore, seguendo qualche schema di applicazione specifico. In questo modo, la presente invenzione permette di abilitare e disabilitare in modo selettivo sia singole microcelle sia insiemi di microcelle del fotorivelatore, in modo da selezionare l'area fotosensibile del fotorivelatore o in tempo reale, o temporaneamente, o permanentemente. Questa capacità di abilitare/disabilitare in modo selettivo le microcelle del fotorivelatore permette di disabilitare in modo selettivo

microcelle fuori posizione o microcelle che mostrano basse prestazioni a causa, per esempio, di un elevato rumore o difetti di fabbricazione. In questo caso, un vantaggio è che il rumore del fotorivelatore complessivo può essere ridotto drasticamente poiché le microcelle disabilitate non contribuiscono al rumore, e quindi il rapporto segnale-rumore migliora. Inoltre, in condizioni di livelli di segnale luminoso alto sul fotorivelatore (ossia elevato flusso di fotoni), il regime di singolo fotone può essere garantito disabilitando un numero adatto di microcelle del fotorivelatore.

Secondo la presente invenzione, il modulo di output 12 è configurato per combinare i segnali in arrivo dalle microcelle 11. Tale combinazione può essere eseguita sia analogicamente che digitalmente, come sarà più chiaro dalla seguente descrizione. Preferibilmente, il modulo di output 12 è configurato per fornire un impulso di tensione o corrente (per esempio di pochi volt o qualche milliampere) sulla linea di output 13 ogni volta che un fotone è rivelato dal dispositivo fotosensibile, con una precisione temporale di poche decine di picosecondi. Possono essere previste un numero di linee di output, essendo ciascuna linea di output utilizzata per trasportare impulsi di tensione o corrente che indicano la rivelazione di un fotone su aree diverse del fotorivelatore 1, comprendendo ciascuna area un dato numero di microcelle 11.

Qui nel seguito, sarà descritta nel dettaglio una forma di realizzazione preferita della presente invenzione. Secondo una tale forma di realizzazione, come anticipato sopra, ciascun primo dispositivo 111 e secondo dispositivo 112 è un dispositivo fotosensibile e in particolare uno SPAD.

Tre diversi schemi di implementazione possibili di una singola microcella 11 sono mostrati in Figure 2a, 2b e 2c. In tutti i casi, il primo SPAD 111 e il secondo SPAD 112 sono connessi ad un modulo di time-gating 113 comune che aziona sia il primo SPAD 111 che il secondo SPAD 112. Secondo forme di realizzazione alternative non mostrate nelle Figure, possono essere previsti due moduli di time-gating, ciascuno connesso rispettivamente ad uno tra il primo SPAD 111 e il secondo SPAD 112.

Inoltre, i due SPAD 111 e 112 sono connessi ad uno stesso modulo di

frontend 114a e ad uno stesso modulo di lettura 114b sotto forma di un circuito di lettura differenziale. Come discusso sopra, il circuito di lettura differenziale 114b è in grado di essere insensibile all'effetto della modulazione di tensione di polarizzazione causato dalla modalità di funzionamento fast-gated della microcella 11, che vuol dire che è in grado di rigettare variazioni di tensione di modo comune. Nelle Figure 2a e 2b il simbolo  $V_{bias}$  indica una tensione di polarizzazione.

In Figura 2a viene mostrato un primo schema di implementazione secondo il quale il modulo di time-gating 113 è connesso al catodo sia del primo SPAD 111 che del secondo SPAD 112, mentre i moduli di frontend 114a e di lettura 114b sono entrambi connessi all'anodo dei due SPAD 111 e 112. In Figura 2b viene mostrato un secondo schema di implementazione secondo il quale un modulo di time-gating 113 è connesso all'anodo sia del primo SPAD 111 che del secondo SPAD 112. Anche i moduli di frontend 114a e di lettura 114b sono entrambi connessi all'anodo dei due SPAD 111, 112. I moduli di frontend 114a e di lettura 114b sono in una posizione intermedia tra il modulo di time-gating 113 e i due SPAD 111, 112. In Figura 2c, è mostrato un terzo schema di implementazione secondo il quale il modulo di time-gating 113 è connesso al catodo sia del primo SPAD 111 che del secondo SPAD 112. Inoltre i moduli di frontend 114a e di lettura 114b sono connessi al catodo dei due SPAD 111 e 112 in una posizione intermedia tra gli SPAD 111 e 112 e il modulo di time-gating 113. Il simbolo  $V_{bias1}$  indica una prima tensione di polarizzazione e il simbolo  $V_{bias2}$  indica una seconda tensione di polarizzazione.

In tutti gli schemi, il segnale di gate è fornito al modulo di time-gating 113 in corrispondenza dell'input 14, che lo utilizza per modulare la tensione di polarizzazione inversa dei due SPAD 111 e 112, da sotto a sopra il valore di breakdown. Inoltre, secondo gli schemi delle Figure 2a e 2b, che mostrano forme di realizzazione preferite della presente invenzione, i moduli di frontend 114a e lettura 114b sono connessi all'anodo degli SPAD 111, 112. Nelle tecnologie CMOS, questo è vantaggioso se l'anodo è il terminale dello SPAD con la capacità parassita più bassa, migliorando quindi le prestazioni

di rivelazione di fotone. Secondo altre forme di realizzazione, il modulo di lettura 114b può essere connesso al catodo dei due SPAD 111 e 112.

Le Figure 3a e 3b mostrano due possibili schemi di implementazione del modulo di lettura 114b. Nelle forme di realizzazione mostrate nelle Figure 3a e 3b, gli SPAD 111 e 112 sono azionati per mezzo di un modulo di time-gating 113 connesso all'anodo degli SPAD 111 e 112, rispettivamente. Nelle Figure 3a e 3b, il blocco che rappresenta il modulo di time-gating 113 comprende anche le funzioni del modulo di frontend 114a. Quando un fotone incide o sul primo SPAD 111 o sul secondo SPAD 112, una valanga è accesa in tale SPAD, e un corrispondente segnale di valanga (per esempio un aumento di tensione) è generato in corrispondenza dell'anodo di tale SPAD.

Secondo le forme di realizzazione schematicamente rappresentate in Figura 3a, il modulo di lettura 114b comprende un primo comparatore 115a avente il suo terminale di input positivo (“+”) connesso all'anodo del primo SPAD 111 e il suo terminale di input negativo (“-“) connesso all'anodo del secondo SPAD 112, e un secondo comparatore 115b avente il suo terminale di input positivo connesso all'anodo del secondo SPAD 112 e il suo terminale di input negativo connesso all'anodo del primo SPAD 111, rispettivamente. Ciascun comparatore 115a e 115b è configurato per determinare se la tensione in corrispondenza del terminale di input positivo è maggiore della tensione in corrispondenza del terminale di input negativo di una soglia predeterminata. In altre parole, ciascun comparatore 115a e 115b è configurato per determinare se la tensione in corrispondenza dell'anodo di un rispettivo SPAD 111, 112 è maggiore della tensione in corrispondenza dell'anodo dell'altro SPAD 112, 111 di una soglia predefinita. In particolare, preferibilmente, ciascun comparatore 115a, 115b è configurato per comparare le due tensioni in corrispondenza degli anodi degli SPAD 111, 112 e fornire un segnale di output digitale uguale a 1 quando la tensione del rispettivo SPAD 111, 112 è maggiore della tensione in corrispondenza dell'anodo dell'altro SPAD 112, 111 di una soglia predeterminata e uguale a 0 nel caso opposto. Il modulo di lettura 114b inoltre preferibilmente

comprende una porta OR 116 connessa all'output sia del primo comparatore 115a che del secondo comparatore 115b. La porta OR 116 è quindi preferibilmente configurata per fornire un segnale di output indicativo della rivelazione di un fotone da parte di uno qualsiasi dei due SPAD 111, 112. Infatti, quando un fotone incide sul primo SPAD 111, un segnale di valanga è generato in corrispondenza del suo anodo, mentre nessun segnale compare in corrispondenza dell'anodo del secondo SPAD 112. In questo caso, l'output del primo comparatore 115a è 1, mentre l'output del secondo comparatore 115b è zero. Quindi l'output della porta OR 116 è 1 e indica la rivelazione di un fotone da parte del primo SPAD 111. Lo stesso vale nel caso di un fotone incidente sul secondo SPAD 112.

Secondo le forme di realizzazione schematicamente rappresentate in Figura 3b, il modulo di lettura 114b comprende una porta OR-esclusivo (XOR) 117 avente due input, ciascuno connesso all'anodo di un rispettivo SPAD 111, 112. La porta XOR 117 è configurata per fornire un segnale di output digitale uguale a 1 quando un segnale di valanga maggiore di una soglia di tensione predefinita è generato in corrispondenza dell'anodo del primo SPAD 111 o del secondo SPAD 112. Si noti che il ritardo di propagazione della porta XOR, in corrispondenza della commutazione di ciascun input, deve essere progettato per essere identico per entrambi i due input.

La Figura 4 mostra forme d'onda di tensione semplificate (a)-(d) che mostrano il funzionamento del modulo di lettura 114b di Figura 3a o 3b. Come mostrato nella forma d'onda (a) di Figura 4, un segnale di gate semplificato, in corrispondenza dell'input del modulo di time-gating 113, può comprendere una sequenza di impulsi sostanzialmente quadrati di una durata predeterminata. Come già citato sopra, questa durata, ossia l'intervallo di tempo durante il quale il segnale di gate è ON, sarà indicata come "finestra di gate". Durante la finestra di gate, la modalità di funzionamento dei due SPAD 111, 112 è ON così che essi sono abilitati a rivelare fotoni incidenti sulla loro area attiva, mentre al di fuori della finestra di gate la loro modalità di funzionamento è OFF. Quando un fotone arriva sul

primo SPAD 111 (il cui evento è rappresentato dalla freccia sopra la forma d'onda di segnale di gate), un segnale di valanga è generato in corrispondenza dell'anodo a1 del primo SPAD 111. La forma d'onda (b) mostra le variazioni della tensione in corrispondenza dell'anodo a1 del primo SPAD 111, mentre la forma d'onda (c) mostra le variazioni di tensione in corrispondenza dell'anodo a2 del secondo SPAD 112. In particolare, all'arrivo del fotone, la forma d'onda della tensione dell'anodo (b) mostra una rampa crescente mentre la forma d'onda della tensione dell'anodo (c) rimane al suo livello basso. La forma d'onda (d) mostra l'output del modulo di lettura 114b. Come mostrato, l'output del modulo di lettura 114b sale da zero a 1 quando il segnale di valanga è prodotto in corrispondenza dell'anodo a1, indicando la rivelazione del fotone da parte del primo SPAD 111.

Vantaggiosamente, come già discusso sopra, applicare lo stesso segnale di gate a entrambi gli SPAD di ciascuna coppia in una microcella garantisce che i due input del modulo di lettura sperimentino gli stessi effetti a causa della modulazione di tensione di polarizzazione. In questo modo, il funzionamento in time-gating non causa alcun disequilibrio differenziale e quindi nessun segnale di output. Un segnale di output dal modulo di lettura si verifica solo nel caso di accensione di una valanga in uno degli SPAD connessi al modulo di lettura, ossia nel caso sia rivelato un fotone in uno degli SPAD.

La Figura 5a mostra un'implementazione circuitale esemplificativa del modulo di time-gating 113 secondo una forma di realizzazione del tipo rappresentato nello schema di Figura 3b. L'implementazione circuitale di Figura 5a implementa anche parte delle funzioni del modulo di frontend 114a (circuiti di spegnimento valanga). La Figura 5a mostra anche un blocco 114a' che implementa altre funzioni del modulo di frontend 114a e una porta XOR 117 che implementa il modulo di lettura 114b. La Figura 5b mostra le forme d'onda dei segnali usati nel circuito di Figura 5a. La Figura 5c mostra dettagli di implementazione del blocco 114a' di Figura 5a. In queste Figure, i segnali sono indicati con etichette corrispondenti: "GATE" indica il segnale di gate, "GATE" con una barra sopra indica un complementare del segnale di

GATE (indicato anche come segnale “not-GATE”), “GATE\_del” indica una replica ritardata del segnale di gate, “QUENCH” indica una replica del segnale di gate quando la microcella è pronta a rivelare fotoni (ossia quando la microcella è abilitata), “RESET” indica un impulso che è sincrono con il fronte di inizio della finestra di gate, “ENABLE” indica il segnale di abilitazione, e “EVENT” indica il segnale di output di microcella.

In particolare, la Figura 5a mostra un circuito esemplificativo connesso al primo SPAD 111. Lo stesso circuito può essere utilizzato anche per il secondo SPAD 112. Il circuito mostrato in Figura 5a è usato sia per attivare il primo SPAD 111 durante la finestra di gate che per spegnere la valanga del primo SPAD 111 che è generata quando un fotone è ricevuto. Il simbolo “Vbias” indica la tensione di polarizzazione in corrispondenza del catodo del primo SPAD 111. La Figura 5a mostra schematicamente anche una possibile implementazione del modulo di lettura 114b come una porta XOR, in cui un input di questo modulo di lettura 114b è connesso all’anodo a1 del primo SPAD 111 mentre l’altro all’anodo del secondo SPAD 112 (questa connessione non è mostrata in Figura 5a).

Il circuito esemplificativo di Figura 5a comprende un primo transistor M1, il cui terminale di drain è connesso all’anodo a1 del primo SPAD 111 mentre il terminale di source è connesso alla massa. Il transistor M1 è usato per attivare il primo SPAD 111 scaricando l’anodo a1 a massa polarizzando quindi il primo SPAD 111 sopra la tensione di breakdown. Inoltre, quando il transistor M1 è spento, esso spegne la corrente di valanga fermando il flusso di corrente verso la massa.

Il terminale di gate del transistor M1 è connesso al terminale di drain di un secondo transistor M2, il cui terminale di source è connesso al terminale di drain di un terzo transistor M3. Il terminale di drain del transistor M2 è connesso al terminale di drain di un quarto transistor M4, mentre il terminale di gate del transistor M2 è connesso all’anodo dello SPAD, al terminale di drain di M1 e al terminale di drain del transistor M5. Infine, il terminale di drain del transistor M2 è connesso anche al terminale di drain del transistor M6. I terminali di source dei transistor M5, M6 sono ad una tensione di

alimentazione VDD. Il transistor M3 è controllato dal segnale GATE\_del. Il transistor M4 è controllato dal segnale not\_GATE. I terminali di source dei transistor M3 e M4 sono connessi a massa. Il transistor M5 è controllato dal segnale QUENCH. Il transistor M6 è controllato dal segnale RESET, che, come anticipato sopra, è un impulso usato per caricare il gate del transistor M1 ed è sincrono con il fronte di inizio della finestra di gate.

Quando il segnale GATE è basso, il transistor M5 è mantenuto acceso (ON) perché la sua tensione di gate (controllata dal segnale QUENCH) è a tensione di massa. La tensione in corrispondenza dell'anodo a1 è quindi forzata al valore VDD così che il primo SPAD 111 sia polarizzato inversamente con una tensione inferiore alla tensione di breakdown, la quale previene qualsiasi accensione di valanga (ossia il primo SPAD 111 è spento (OFF)) perché la caduta di tensione  $V_{bias} - VDD$  è dimensionata per essere minore della tensione di breakdown dello SPAD. Quando il segnale di gate GATE è impostato (ossia commuta al suo livello alto), lo SPAD 111 si accende (ON) poiché il transistor M5 è spento (OFF) e il transistor M1 è attivato con un piccolo ritardo per mezzo del segnale RESET che agisce su M6; la durata dell'impulso RESET è tale che, quando M3 si accende, la tensione anodica è già abbastanza bassa da mantenere M2 spento (OFF), e il gate di M1 rimane capacitivamente carico, mantenendo M1 acceso (ON).

Il transistor M3, che è controllato da una replica ritardata del segnale di gate (GATE\_del), inibisce M2 dallo scaricare il gate di M1 durante la prima frazione della finestra di gate, prevenendo quindi qualsiasi percorso diretto che potrebbe permettere alla corrente di fluire da VDD a massa attraverso la serie di transistor M6, M2 e M3, riducendo quindi notevolmente il consumo di potenza complessivo.

Quando il segnale GATE è resettato (ossia esso ritorna al suo valore basso) alla fine della finestra di gate, il transistor M1 è spento (OFF) perché il transistor M4 è acceso (ON) e il transistor M5 si accende (ON), aumentando quindi nuovamente la tensione in corrispondenza dell'anodo a1, così che lo SPAD 111 viene spento (OFF).

Quando la corrente di valanga inizia a fluire perché un fotone colpisce lo

SPAD 111 durante la finestra di gate, l'impedenza iniziale vista in corrispondenza dell'anodo a1 è relativamente bassa (poiché il transistor M1 è acceso), quindi essa aumenta gradualmente (poiché il transistor M2 si accende gradualmente), causando quindi una riduzione della tensione di gate del transistor M1, quindi spegnendolo e dando origine ad un ciclo di feedback positivo, che ferma rapidamente la corrente di valanga dal fluire attraverso lo SPAD.

Quando la valanga causa l'incremento della tensione dell'anodo, la porta XOR sente la differenza di tensione tra i due anodi del primo e secondo SPAD 111, 112 e fornisce un impulso di output all'output della porta XOR, che è il segnale di output di microcella EVENT. Allo stesso tempo, l'output della porta XOR è connesso al blocco 114a'.

Una possibile implementazione del blocco 114a' che sequenzia i segnali come riportati in Figura 5b ed esegue simultaneamente l'operazione di hold-off è riportata in Figura 5c.

Il circuito di Figura 5c comprende una logica di hold-off che consiste di una porta AND a tre ingressi 51 che riceve il segnale GATE, il segnale ENABLE, e l'output invertito di un latch Set-Reset (SR) 52. Un circuito Resistore-Condensatore (RC) 53 è connesso in corrispondenza dell'output del latch SR 52. L'output della porta AND 51 è connesso a ulteriori porte logiche 54. Quando la microcella riceve un segnale ENABLE positivo e non ha recentemente rivelato un fotone (ossia l'output invertito del latch SR è alto), il segnale GATE propaga attraverso la porta AND 51 e fornisce il segnale QUENCH, e quindi le porte logiche 54 generano le forme d'onda necessarie per sequenziare il funzionamento dei transistor da M1 a M6, come mostrato in Figura 5c.

Quando una valanga è rivelata, il segnale EVENT imposta il latch SR 52, commutando quindi uno degli input della porta AND 51 ad un valore logico '0'; in questo modo, il segnale QUENCH commuta ad un valore logico '0' causando quindi l'entrata del circuito di time-gating in una condizione di "gate OFF" indipendentemente dallo stato del segnale GATE. Questo impone un tempo di hold-off al rivelatore, come richiesto dopo ciascun evento di

valanga.

Dopo un certo tempo di hold-off, impostato dalla costante di tempo del circuito RC 53, il latch viene resettato e il periodo di hold-off finisce, permettendo quindi al segnale QUENCH di seguire nuovamente il segnale GATE.

Gli inventori hanno eseguito alcuni test, fabbricando il circuito di Figura 5a in una tecnologia CMOS a 0,35  $\mu\text{m}$ , avente un'area fotosensibile totale di 8 millimetri quadri. I test hanno indicato che la tensione di anodo dello SPAD può raggiungere transizioni con fronte di salita e discesa di 300ps, e che lo SPAD può essere time-gated ad una frequenza di 100 MHz. Questi test hanno in effetti dimostrato che, secondo la presente invenzione, le prestazioni di time-gating sono infatti massimizzate mediante gating ON/OFF su ciascun singolo dispositivo fotosensibile, grazie alla piccola capacità parassita e quindi tempi di transizione salita/discesa veloci sperimentati da ciascuna microcella, invece del grande carico capacitivo fornito dal fotorivelatore nel suo insieme.

La Figura 6 mostra schematicamente una possibile implementazione del modulo di output 12 del fotorivelatore 1 secondo forme di realizzazione della presente invenzione. Il modulo di output 12 di Figura 6 è implementato come un albero di output digitale che usa rami di albero ad H completamente logici. Gli alberi ad H completamente logici sono noti e quindi non verranno descritti ulteriormente nel seguito. In alternativa, l'albero di output digitale può essere implementato usando la logica open-drain, o una combinazione di rami di albero ad H completamente logici e logica open-drain. Nello schema di Figura 6, ciascuna coppia di microcelle 11 è connessa a una prima porta OR 121 del modulo di output 12; ciascuna coppia di prime porte OR 121 è connessa a una seconda porta OR 122; ciascuna coppia di seconde porte OR 122 è connessa a una terza porta OR 123, e così via. Alternativamente, porte NOR possono essere utilizzate al posto delle porte OR. Questo schema vantaggiosamente permette di preservare il tempo di arrivo di fotone con il minimo disallineamento temporale possibile (ossia le differenze di tempo di propagazione) tra l'output di microcelle differenti, in modo tale che il

jitter complessivo nella determinazione dell'istante di arrivo del fotone sia minimizzato. L'output del fotorivelatore è quindi indicativo di qualsiasi rivelazione di fotone eseguita dalle microcelle. Può essere disponibile off-chip per ulteriore elaborazione di dati o può essere elaborato da uno o più circuiti on-chip, come verrà descritto nel seguito.

Come già menzionato nella descrizione precedente, la quantità di segnale luminoso che raggiunge il fotorivelatore (che dipende da un numero di fattori come la potenza e la lunghezza d'onda della sorgente luminosa, il campione o scena da misurare, la distanza percorsa dalla luce, ecc.) deve essere regolata su diversi ordini di grandezza per garantire il regime di singolo fotone ed evitare la saturazione del fotorivelatore. Tipicamente, per forti segnali luminosi basta una piccola area, mentre segnali luminosi deboli necessitano di un'area sensibile di raccolta larga. Come già descritto sopra, l'area fotosensibile del fotorivelatore può essere regolata dall'utente grazie alla possibilità di abilitare/disabilitare in modo selettivo ciascuna microcella. Pertanto, è vantaggiosamente possibile ottimizzare il tasso di rivelazione di fotoni di diversi ordini di grandezza di intensità del segnale luminoso. Inoltre, secondo forme di realizzazione vantaggiose della presente invenzione, il fotorivelatore 1 può comprendere un numero predefinito di microcelle aventi aree attive più piccole. Le aree attive di questo numero di microcelle possono essere di dimensioni diverse. In pratica, questo può essere ottenuto fabbricando un numero di SPAD con diverse aree attive, o fornendo SPAD con la stessa area attiva, ma con uno schermo opaco da posizionare sopra parte dell'area attiva, per variare in modo corrispondente l'area sensibile utile. Questo schermo può essere realizzato per mezzo di un pin-hole metallico.

La Figura 7 mostra schematicamente una porzione di un fotorivelatore secondo una forma di realizzazione della presente invenzione, in cui alcune microcelle (in corrispondenza del centro della porzione mostrata in Figura 7) hanno aree attive di dimensioni più piccole a confronto con quelle laterali. Per esempio, nella Figura 7 le microcelle del fotorivelatore hanno cinque dimensioni di area attiva diverse.

Secondo la presente invenzione, le microcelle di area attiva più piccola possono essere abilitate simultaneamente con le altre microcelle per massimizzare l'area fotosensibile, o possono essere abilitate separatamente. Questo permette di ridurre la probabilità di saturazione del fotorivelatore quando un segnale luminoso intenso illumina il fotorivelatore. Usando microcelle con aree attive di diverse dimensioni, è possibile sfruttare un intervallo dinamico più ampio del fotorivelatore rispetto all'uso di microcelle con la stessa area attiva per tutto il fotorivelatore. Inoltre, una varietà di dimensioni di area attiva diverse permette di migliorare la granularità dell'attenuazione ottenibile.

L'attenuazione può essere misurata attraverso il parametro fattore di attenuazione, indicato anche come AF, che è definito come il rapporto tra l'area attiva ottenibile minima, diviso l'area attiva ottenibile massima. Per esempio, con un array di 100 microcelle, ciascuna con area attiva  $A_1$ , è possibile regolare il livello di segnale su 2 ordini di grandezza: infatti, l'area attiva minima è  $A_1$ , l'area attiva massima  $100 A_1$  e quindi il fattore di attenuazione massimo  $AF_{MAX}$  è  $1/100$ . Con un array di 1000 microcelle è possibile cambiare il livello su 3 ordini di grandezza. E' importante notare che l'AF può essere esteso di un ordine di grandezza solo con un incremento equivalente di ordine di grandezza nel numero di microcelle.

Tuttavia, alcune applicazioni come TD-NIRS, possono richiedere rapporti di attenuazione di 6-7 ordini di grandezza. In questi casi, l'uso di microcelle con aree attive di dimensioni diverse come descritto sopra può estendere l'AF senza incrementare il numero complessivo richiesto di microcelle. Per esempio, assumendo di avere un array con 999 microcelle con area attiva  $A_1$  e 1 microcella con area attiva  $A_2=A_1/100$ , il fattore di attenuazione massimo  $AF_{MAX}$  sarà di 5 ordini di grandezza, dato da:

$$AF_{MAX} = \frac{A_2}{999 \cdot A_1 + A_2} = \frac{A_2}{999 \cdot 100 \cdot A_2 + A_2} = \frac{1}{99901} \cong 10^{-5}$$

Questo approccio permette di estendere il fattore di attenuazione senza aumentare il numero complessivo di celle.

Secondo un altro esempio, si assume che un fotorivelatore abbia un numero totale di 2500 microcelle, avendo microcelle con 5 dimensioni di area attiva diverse,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  e  $A_5$ . Dall'area attiva più piccola alla più larga:  $A_1$  è  $20 \mu\text{m}^2$  (il numero totale di queste microcelle nell'array è  $n_1=8$ ),  $A_2$  è  $100 \mu\text{m}^2$  ( $n_2=8$ ),  $A_3$  è  $500 \mu\text{m}^2$  ( $n_3=8$ ),  $A_4$  è  $2500 \mu\text{m}^2$  ( $n_4=8$ ),  $A_5$  è  $5000 \mu\text{m}^2$  ( $n_5=2468$ ).

Il fattore AF può essere calcolato come:

$$AF = \frac{\sum_{i=1}^5 ne_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^5 n_i \cdot A_i}$$

dove il numero intero  $i$  indicizza le diverse dimensioni dell'area attiva,  $n_i$  rappresenta il numero di microcelle che hanno l'area attiva  $A_i$  e  $ne_i$  rappresenta il numero di microcelle abilitate (ENABLED) tra il numero  $n_i$  di microcelle che hanno l'area attiva  $A_i$ .

Le Figure 8a e 8b mostrano, rispettivamente, il fattore di attenuazione di segnale ottenibile AF (ossia, la riduzione ottenibile del numero di fotoni rivelabili) rispetto a qualsiasi possibile combinazione di microcelle abilitate/disabilitate, per un fotorivelatore composto da microcelle con dimensioni di area attiva diverse (Fig. 8a) e uguali (Fig. 8b). L'asse X dei grafici mostrati nelle Figure 8a e 8b riporta un numero di combinazione, mentre l'asse Y riporta il fattore di attenuazione AF. La Figura 8a è relativa ad un fotorivelatore implementato secondo l'esempio descritto qui sopra, avente microcelle con 5 dimensioni di area attiva diverse,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  e  $A_5$ . Come mostrato, il segnale può essere regolato su circa 6 ordini di grandezza con passi molto fini. Al contrario, con un array dello stesso numero complessivo di celle (2500), ma aventi tutte la stessa area attiva  $A_5$  ( $5000 \mu\text{m}^2$ ) l'attenuazione del segnale diventa quella mostrata in Fig. 8b, risultando quindi in una riduzione di 2 ordini di grandezza nelle dinamiche di attenuazione.

Il fotorivelatore 1 secondo la presente invenzione può anche includere ulteriori circuiti elettronici on-chip, configurati per elaborare l'output del modulo di output per contare fotoni (per esempio per fornire l'intensità di segnale luminoso), per temporizzare o attribuire un tempo ai dei fotoni (per

esempio per registrare il tempo di volo di singoli fotoni o la costante di tempo di decadimento del segnale luminoso), per correlazione dei modelli (per esempio per rilevare quando e dove più fotoni colpiscono il fotorivelatore allo stesso tempo o con un dato ritardo di tempo), ecc. Per esempio, il chip del fotorivelatore può comprendere contatori digitali in su/giù, convertitori tempo-digitali (TDCs, Time-to-Digital Converters), circuiti logici per costruire istogrammi dei tempi di arrivo di fotoni, ecc. Il chip può inoltre comprendere circuiti elettronici per l'abilitazione e disabilitazione sincronizzata di microcelle.

In particolare, un TDC può essere implementato per digitalizzare l'intervallo di tempo tra rivelazioni di fotoni o tra ciascuna rivelazione di fotone e un segnale di sincronizzazione globale (per esempio l'eccitazione ad impulso laser). L'output digitale del TDC può essere o disponibile off-chip (attraverso un bus digitale dedicato) per analisi di dati di ciascun tempo di arrivo di fotone, o può alimentare ulteriori elettroniche on-chip, per esempio un costruttore di istogramma per accumulare la distribuzione di tempi di arrivo di fotoni tramite la nota tecnica TCSPC (Time Correlated Single-Photon Counting) o simili. Anche contatori di eventi e altra circuiteria aggiuntiva possono essere inclusi on-chip, per esempio per fornire il conteggio totale o parziale dei fotoni rivelati all'interno di un intervallo di tempo predefinito (come, per esempio, una o più finestre di gate).

Alla luce di quanto sopra, è evidente che il fotorivelatore secondo la presente invenzione mostra un numero di vantaggi, alcuni dei quali sono stati già discussi sopra:

- il fotorivelatore descritto è un rivelatore a singolo fotone ad area larga (in particolare, maggiore di 0,5 millimetri quadri) che può essere abilitato (gated) ON/OFF con transizioni di salita/discesa minori di un nanosecondo.
- la presenza di un circuito di lettura differenziale, secondo le forme di realizzazioni preferite dell'invenzione descritte sopra, permette di rigettare il modo comune non voluto che influenza entrambi i dispositivi di ciascuna microcella, così che l'output del circuito di lettura differenziale

- fornisca solo l'effettiva rivelazione di un fotone;
- secondo una forma di realizzazione preferita della presente invenzione, la presenza di due dispositivi fotosensibili in ciascuna microcella, in particolare due SPAD, permette di massimizzare il fattore di riempimento del fotorivelatore;
  - ciascuna microcella può essere abilitata/disabilitata in modo selettivo così che l'area fotosensibile del fotorivelatore può essere aumentata/diminuita dall'utente per ottimizzare le prestazioni del fotorivelatore in una specifica applicazione o per regolare la sensibilità del fotorivelatore, in funzione dell'intensità luminosa;
  - l'area attiva di ciascuna microcella può inoltre essere adattata (ossia può essere resa più piccola di un fattore di scala predefinito), per ottenere un intervallo dinamico maggiore e migliore granularità nel regolare la sensibilità del fotorivelatore. Inoltre, microcelle con aree attive di dimensioni diverse permettono di cambiare e di sagomare l'area fotosensibile del fotorivelatore in modo da selezionare solo alcune porzioni di un fascio di luce incidente (per esempio per escludere spot più luminosi o esplorare solo specifiche regioni di interesse).

## **RIVENDICAZIONI**

1. Un fotorivelatore (1) comprendente:
  - un array di microcelle (11);
  - un modulo di output (12) configurato per raccogliere da ciascuna microcella un segnale di output che indica una rivelazione di fotone e combinare i segnali di output raccolti in almeno una linea di output (13),  
in cui ciascuna microcella comprende:
    - un primo dispositivo (111) e un secondo dispositivo (112), in cui almeno uno di detto primo dispositivo (111) e detto secondo dispositivo (112) è un dispositivo fotosensibile in grado di rivelare detto fotone;
    - un modulo di time-gating (113) connesso a detto almeno un dispositivo fotosensibile e configurato per fornire un segnale di gate all'almeno un dispositivo fotosensibile per attivare detto almeno un dispositivo fotosensibile; e
    - un modulo di lettura (114b) configurato per ricevere, all'arrivo di detto fotone su detto almeno un dispositivo fotosensibile attivato, un corrispondente segnale da detto almeno un dispositivo fotosensibile attivato e, in base a detto segnale ricevuto, fornire detto segnale di output a detto modulo di output (12).
2. Il fotorivelatore (1) secondo la rivendicazione 1, in cui sia detto primo dispositivo (111) che detto secondo dispositivo (112) sono dispositivi fotosensibili.
3. Il fotorivelatore (1) secondo la rivendicazione 2, in cui sia detto primo dispositivo (111) che detto secondo dispositivo (112) sono diodi a valanga a singolo fotone.
4. Il fotorivelatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto modulo di time-gating (113) è configurato per attivare detto almeno un dispositivo fotosensibile per mezzo di un segnale di gate comprendente una sequenza di impulsi, ciascun impulso avendo una

durata predeterminata durante la quale detto almeno un dispositivo fotosensibile è acceso.

5. Il fotorivelatore (1) secondo la rivendicazione 4, in cui detto modulo di time-gating (113) è configurato per applicare uno stesso segnale di gate a detto primo dispositivo fotosensibile (111) e a detto secondo dispositivo fotosensibile (112).
6. Il fotorivelatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto modulo di lettura (114b) è un circuito di lettura differenziale configurato per rivelare una variazione di corrente/tensione in detto primo dispositivo (111) o in detto secondo dispositivo (111) causata da detta rivelazione di detto fotone e fornire detto segnale di output indicativo di detta rivelazione.
7. Il fotorivelatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui ciascuna microcella (11) è configurata per ricevere un rispettivo segnale di abilitazione per abilitare o disabilitare detta microcella (11).
8. Il fotorivelatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto modulo di output (12) comprende rami di albero ad H completamente logici.
9. Il fotorivelatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui una sua area attiva totale è uguale ad almeno  $0,5 \text{ mm}^2$ .
10. Il fotorivelatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui esso comprende un numero di microcelle con aree attive di dimensioni diverse.

**RIASSUNTO**

E' descritto un fotorivelatore comprendente un array di microcelle e un modulo di output configurato per raccogliere da ciascuna microcella un segnale di output indicativo di una rivelazione di fotone e per combinare i segnali di output raccolti in almeno una linea di output. Ciascuna microcella comprende un primo dispositivo e un secondo dispositivo, in cui almeno uno dei dispositivi è un dispositivo fotosensibile in grado di rivelare il fotone, un modulo di time-gating connesso a detto almeno un dispositivo fotosensibile e configurato per fornire un segnale di gate all' almeno un dispositivo fotosensibile per attivarlo e un modulo di lettura configurato per ricevere, all'arrivo del fotone sull' almeno un dispositivo fotosensibile attivato, un corrispondente segnale dall' almeno un dispositivo fotosensibile attivato e, in base al segnale ricevuto, fornire un segnale di output al modulo di output.

(Fig. 1)