



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETÀ INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

UIBM

DOMANDA NUMERO	102013902128036
Data Deposito	15/02/2013
Data Pubblicazione	15/08/2014

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	T		

Titolo

DISPOSITIVO SENSORE FOTONICO

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Dispositivo sensore fotonico"

di: THE UNIVERSITY COURT OF THE UNIVERSITY OF
EDINBURGH, nazionalità britannica, Old College, South
Bridge, EH8 9YL Edinburgo (REGNO UNITO),

e di: FONDAZIONE BRUNO KESSLER, nazionalità italiana,
Via S. Croce 77, I-38122 Trento (ITALIA).

Inventori designati: WALKER Richard John, HENDERSON
Robert Kelvin, STOPPA David, PERENZONI Matteo, CAMPOS
BRAGA Leo Huf, MASSARI Nicola, GASPARINI Leonardo

Depositata il: 15 Febbraio 2013

DESCRIZIONE

CAMPO TECNICO

La presente invenzione si riferisce ad un sensore fotonico che è, ad esempio, adatto per il rilevamento asincrono e la misura di eventi fotonici sparsi. Il sensore in alcune forme di attuazione trova applicazione ogni qualvolta vengono generati brevi (ad esempio, poche centinaia di ns) impulsi di luce e si desidera catturare con precisione la posizione spaziale ed il tempo di arrivo, oltre a determinare il numero di fotoni nell'evento. Un'applicazione è quella nel campo della Tomografia ad Emissione di Positroni. Tuttavia l'invenzione non è limitata alla rivelazione di raggi

gamma e può anche essere applicata a molte aree della biofotonica, della fotonica quantica, della fotonica a raggi X, della spettroscopia e della fisica delle particelle.

STATO DELL'ARTE

La Tomografia ad Emissione di Positroni ("Positron Emission Tomography" - PET) è una tecnica nucleare di generazione di immagini che fornisce immagini tridimensionali funzionali del corpo, e trova le sue applicazioni principali in oncologia clinica e nelle analisi delle funzioni cerebrali. I sistemi di generazione di immagini a PET comportano il rilevamento di coppie di fotoni gamma coincidenti e diametralmente opposti, che vengono generati dall'annichilazione di un positrone emesso nel processo di decadimento di un tracciante radioattivo iniettato in un paziente o altro soggetto. Questi fotoni gamma sono assorbiti da cristalli scintillatori, che emettono un debole impulso di fotoni visibili per ciascun fotone gamma assorbito.

Un sistema PET efficiente deve misurare la posizione spaziale dell'evento, il tempo di arrivo preciso dell'impulso di luce di scintillazione (per un riconoscimento di coincidenza), ed il numero di fotoni rilevati, permettendo la valutazione dell'energia del fo-

tone gamma incidente (in modo da poter scartare rilevamenti con energia non corretta, come radiazione di fondo o raggi dispersi).

Il rivelatore in un sistema di generazione di immagini PET deve non soltanto essere sufficientemente sensibile, poiché il numero di fotoni emessi è estremamente basso, ma deve anche fornire informazioni nel dominio del tempo sull'arrivo di fotoni incidenti per soddisfare i requisiti precedenti. In un sistema tradizionale, ogni scintillatore ² è accoppiato ad un tubo moltiplicatore di fotoni ("Photon Multiplier Tube" - PMT) ⁴, formando un modulo rivelatore, con molti di questi moduli formanti un anello ⁶ intorno al paziente ⁸, come è illustrato schematicamente nella figura 1.

Mentre i PMT costituiscono una tecnologia sviluppata, che presenta un'ottima sensibilità, essi sono tuttavia soggetti ad un certo numero di svantaggi importanti per il fatto che sono incompatibili con campi magnetici, costosi, ingombranti, fragili, e richiedono tensioni di polarizzazione molto alte. Il primo di questi svantaggi, l'incompatibilità con campi magnetici, costituisce una barriera significativa allo sviluppo di scanner combinati PET - MRI, il che permetterebbe l'effettuazione simultanea in una singola apparecchiatura della generazione di immagini sia fisiolo-

giche sia funzionali, senza possibilità di problemi di movimento del paziente o di allineamento che sfocano l'immagine risultante, obiettivo di lunga data della comunità che si occupa della generazione di immagini medicali. Il costo dei rivelatori PMT in un tipico sistema rappresenta una frazione significativa del costo complessivo dell'apparecchiatura, il che limita il numero di istituzioni che possono permettersi l'apparecchiatura. Infine, le limitazioni rimanenti aumentano l'ingombro dell'apparecchiatura completa.

Negli ultimi anni si è manifestato un crescente interesse per la realizzazione di un'alternativa CMOS robusta, di basso costo e producibile in serie, al PMT, il rivelatore da lunga data preferito in molte applicazioni di generazione di immagini nucleari, come PET, allo scopo di eliminare le limitazioni discusse in precedenza. I fotomoltiplicatori al silicio ("Silicon Photon-Multiplier" - SiPM) forniscono un'alternativa diretta al PMT, comprendente una matrice di Diodi a Valanga a Singolo Fotone ("Single Photon Avalanche Diode" - SPAD), denominati anche FotoDiodi a Valanga ("Avalanche PhotoDiode" - APD) in modalità Geiger, accoppiati elettricamente per fornire un'uscita analogica.

Un approccio CMOS può potenzialmente fornire di-

versi vantaggi rispetto ai PMT. Ad esempio, sistemi basati su CMOS possono essere compatibili con campi magnetici permettendo modalità combinate PET - MRI. Tali sistemi possono anche essere più economici (ad esempio, fabbricati utilizzando un processo CMOS in grande serie) e più piccoli (ad esempio, lo spessore del sensore può essere inferiore ad 1 mm, rispetto a ~100 mm per molti PMT). Inoltre, un'elaborazione del segnale analogica e digitale sul "chip" può eliminare la necessità di svariati componenti esterni, con il risultato di una riduzione nell'assorbimento di potenza, nella dimensione del sistema e nella distinta base dei materiali.

Benché vi siano molti SiPM a stato solido applicati alla PET e prodotti in processi associati con CMOS, questi sensori spesso non contengono una capacità di elaborazione significativa incorporata e normalmente non sono in grado di fornire una mappa di tempi e posizioni di arrivo dei fotoni.

US 7.723.694 descrive un esempio di un dispositivo sensore fotonico che utilizza fotodiodi, in questo caso utilizzato in uno scanner per tomografia ad emissione di positroni a tempo di volo. Una pluralità di rivelatori sono disposti in anelli intorno ad un paziente. Ciascun rivelatore comprende uno scintillatore

ed una matrice associata di pixel rivelatori, con ciascun pixel rivelatore che fornisce in uscita, attraverso un circuito di lettura del livello del pixel, una rappresentazione digitale di un conteggio di fotoni ed una marcatura temporale ("time-stamp") per ciascun evento di scintillazione rilevato. Ogni pixel comprende una matrice di celle rivelatrici, ciascuna delle quali include un fotodiodo. Eventi di rilevamento di scintillazione sono attivati in risposta al superamento di una soglia da parte di un segnale da una delle celle rivelatrici. Tuttavia, attivando delle uscite da singole celle rivelatrici, il dispositivo è sensibile a celle rivelatrici difettose, ed a segnali falsi positivi. US 7.723.694 descrive l'inibizione di celle difettose, ma questo può essere dispendioso in termini di tempo e può a sua volta essere soggetto ad errori. Inoltre, i difetti nelle celle possono svilupparsi nel tempo, richiedendo un monitoraggio ripetuto di difetti. Inoltre, l'apparecchiatura fornisce dati di intensità e di posizione per ciascun evento innescato, ma non permette un monitoraggio di profili temporali di eventi o dei periodi che precedono gli eventi.

Altri esempi di dispositivi sensori fotonici noti basati su diodi sono descritti in US 7.626.389 ed in

SINTESI

In un primo aspetto dell'invenzione, si realizza un dispositivo sensore per il rilevamento di fotoni, comprendente una pluralità di pixel, con ciascun pixel comprendente una pluralità di rivelatori di fotoni ed una logica di elaborazione atta a fornire in uscita un rispettivo segnale di rilevamento per questo pixel per ciascun intervallo di una serie di intervalli temporali ("time bin" nella letteratura tecnica anglosassone), un combinatore atto, per ciascun intervallo temporale, a combinare i segnali di rilevamento da ciascun pixel in modo da produrre un segnale di rilevamento combinato per questo intervallo temporale, ed un dispositivo di monitoraggio di eventi per identificare il verificarsi di un evento di rilevamento durante un intervallo temporale particolare in funzione del valore di almeno uno dei segnali di rilevamento combinati. La determinazione può essere effettuata in funzione del valore del segnale di rilevamento combinato per questo intervallo temporale oppure, ad esempio, in funzione dei valori per questo intervallo temporale e/o per almeno un altro intervallo temporale precedente o seguente.

Il dispositivo sensore può operare in accordo con

una prima modalità prima dell'identificazione di un evento di rilevamento, ed è atto ad entrare in una seconda modalità in risposta al fatto che il dispositivo di monitoraggio di eventi ha identificato il verificarsi di un evento di rilevamento. La prima modalità può essere indicata come modalità inattiva. La seconda modalità può essere una modalità di monitoraggio di eventi.

Il dispositivo può inoltre comprendere mezzi per ottenere un segnale di rilevamento integrato per ciascun pixel, rappresentativo di segnali di rilevamento accumulati durante un periodo di integrazione della seconda modalità.

La logica di elaborazione per ciascun pixel può comprendere un rispettivo integratore, e, nel funzionamento, l'integratore per un pixel può ottenere il segnale di rilevamento integrato per questo pixel.

Il dispositivo sensore può essere atto a passare dalla seconda modalità alla prima modalità quando è terminato il periodo di integrazione.

Per ciascun pixel, la logica di elaborazione può comprendere almeno un dispositivo di marcatura temporale che è atto a fornire una marcatura temporale per registrare il tempo di rilevamento di uno o più fotoni da parte dei rivelatori di questo pixel.

La marcatura temporale può registrare il tempo di rilevamento con una risoluzione più fine della lunghezza dell'intervallo temporale.

Il dispositivo può inoltre comprendere mezzi per determinare un tempo dell'evento dai dati di marcatura temporale ottenuti da ciascun pixel della pluralità di pixel, ad esempio calcolando la media dei dati di marcatura temporale ottenuti dalla pluralità di pixel.

Detto almeno un dispositivo di marcatura temporale di un pixel può essere atto a fornire una singola marcatura temporale per ciascun intervallo temporale per cui viene rilevato almeno un fotone.

Per ciascun pixel, la logica di elaborazione può comprendere un primo dispositivo di marcatura temporale ed un secondo dispositivo di marcatura temporale, ed il primo ed il secondo dispositivo di marcatura temporale possono essere utilizzati in modo alternato, in modo che il primo dispositivo di marcatura temporale sia utilizzato per fornire una marcatura temporale durante alcuni intervalli temporali, ed il secondo dispositivo di marcatura temporale sia utilizzato per fornire una marcatura temporale durante altri intervalli temporali.

Il dispositivo può inoltre comprendere, per ciascun pixel, un mezzo di memorizzazione dati che è atto

a memorizzare almeno un segnale di rilevamento e/o almeno una marcatura temporale per almeno un intervallo temporale precedente per questo pixel.

Per ciascun pixel, il mezzo di memorizzazione dati può essere atto a memorizzare, al momento dell'identificazione del verificarsi di un evento di rilevamento, almeno un segnale di rilevamento e/o almeno una marcatura temporale che precede, durante, o che segue l'identificazione del verificarsi dell'evento di rilevamento.

Questa caratteristica è particolarmente importante e quindi, secondo un ulteriore aspetto indipendente dell'invenzione, si realizza un dispositivo sensore per il rilevamento di fotoni, comprende una pluralità di pixel, con ciascun pixel comprendente una pluralità di rivelatori fotonici ed una logica di elaborazione atta a fornire in uscita un rispettivo segnale di rilevamento per questo pixel per ciascun intervallo di una serie di intervalli temporali, ed un dispositivo di monitoraggio di eventi per identificare il verificarsi di un evento di rilevamento durante un intervallo temporale particolare, in cui, per ciascun pixel, è presente un mezzo di memorizzazione dati che è atto a memorizzare almeno un segnale di rilevamento e/o almeno una marcatura temporale per almeno un intervallo

temporale che precede, durante, o che segue l'identificazione del verificarsi dell'evento di rilevamento.

Il dispositivo di monitoraggio di eventi può essere atto ad includere nel segnale di rilevamento integrato della seconda modalità, ad esempio la modalità di monitoraggio di eventi, i segnali di rilevamento memorizzati per almeno un intervallo temporale che precede, durante, o che segue l'identificazione del verificarsi dell'evento di rilevamento.

Per ciascun pixel, il mezzo di memorizzazione dati può comprendere almeno un FIFO per memorizzare dettoalmeno un segnale di rilevamento e/o almeno un FIFO per memorizzare detta almeno una marcatura temporale.

Il dispositivo di monitoraggio di eventi può essere atto ad inviare uno o più segnali di controllo ("segnali di attivazione") alla logica di elaborazione di ciascun pixel in risposta all'identificazione di un evento di rilevamento, per bloccare il funzionamento dell'almeno un FIFO di questo pixel mentre si trova nella modalità di monitoraggio di eventi.

Per ciascun pixel, la logica di elaborazione può essere atta a rispondere agli uno o più segnali di controllo ("segnali di attivazione") per controllare l'integratore di questo pixel in modo da accumulare il

segnale di rilevamento integrato per il periodo di integrazione.

Il combinatore può comprendere una struttura ad albero comprendente una pluralità di nodi in una pluralità di livelli, in cui la logica di elaborazione di pixel fornisce segnali di rilevamento di pixel ai nodi di radice della struttura ad albero e la struttura ad albero è realizzata in modo che, in ciascun nodo a livelli sopra il nodo di radice, siano combinati i segnali di almeno due nodi ad un livello inferiore della struttura ad albero.

Questa caratteristica è particolarmente importante e quindi, secondo un ulteriore aspetto indipendente dell'invenzione, si realizza un dispositivo sensore per il rilevamento di fotoni, comprendente una pluralità di pixel, con ciascun pixel comprendente una pluralità di rivelatori fotonici ed una logica di elaborazione atta a fornire in uscita un rispettivo segnale di rilevamento per questo pixel per ciascun intervallo di una serie di intervalli temporali, un combinatore atto, per ciascun intervallo temporale, a combinare i segnali di rilevamento di ciascun pixel in modo da produrre un segnale di rilevamento combinato, in cui il combinatore comprende una struttura ad albero comprendente una pluralità di nodi in una pluralità di

livelli, in cui la logica di elaborazione di pixel fornisce segnali di rilevamento di pixel ai nodi di radice della struttura ad albero e la struttura ad albero è realizzata in modo che, in ciascun nodo a livelli sopra il nodo di radice, siano combinati i segnali di almeno due nodi ad un livello inferiore della struttura ad albero.

La combinazione di segnali può comprendere la somma di segnali, e ciascun nodo può comprendere un sommatore.

I nodi possono operare in accordo con una temporizzazione periodica del sensore, ed i nodi possono essere disposti in modo che, in ciascun nodo, i segnali che sono combinati siano segnali che corrispondono allo stesso intervallo temporale.

I nodi possono essere disposti in modo che, per tutti i nodi a ciascun livello della struttura ad albero, i tempi per l'arrivo dei segnali da nodi del livello precedente della struttura ad albero siano sostanzialmente uguali. Così, è possibile ottenere un ritardo di instradamento uguale.

I nodi possono essere disposti in modo che, per tutti i nodi ad ogni livello della struttura ad albero, le distanze dai nodi del livello precedente della struttura ad albero siano sostanzialmente le stesse.

La struttura ad albero può comprendere un nodo di uscita che fornisce in uscita, per ciascun intervallo temporale in successione, un segnale di rilevamento combinato, in cui il segnale di rilevamento combinato per un intervallo temporale rappresenta un totale dei segnali ottenuti da ciascuno dei pixel per questo intervallo temporale.

Il combinatore può comprendere una disposizione gerarchica ad albero di sommatore.

Il dispositivo può inoltre comprendere mezzi per ottenere, per ciascun evento di rilevamento, un profilo del segnale di rilevamento combinato in funzione del tempo.

Il dispositivo può inoltre comprendere mezzi per determinare un istante in cui si verifica l'evento di rilevamento dall'analisi del profilo del segnale di rilevamento combinato in funzione del tempo.

Il dispositivo di monitoraggio di eventi può essere atto ad ottenere, per ciascun evento di rilevamento, uno o più, eventualmente ciascuno, dei seguenti parametri: un profilo del segnale di rilevamento combinato per tutti i pixel in funzione del tempo durante il periodo di integrazione; un segnale di rilevamento integrato per ciascun pixel, rappresentativo dei segnali di rilevamento accumulati da questo pixel duran-

te il periodo di integrazione; dati di marcatura temporale per ciascun pixel.

Per ciascun pixel, la logica di elaborazione può comprendere almeno un dispositivo di marcatura temporale che è atto a fornire una marcatura temporale per registrare l'istante di rilevamento di uno o più fotoni da parte dei rivelatori di questo pixel.

La marcatura temporale può essere inclusa nel segnale di rilevamento per questo pixel e per un periodo di tempo di rilevamento particolare.

La marcatura temporale può registrare l'istante di rilevamento del primo fotone durante un intervallo temporale di rilevamento, o l'istante di rilevamento del secondo fotone, del terzo fotone o l'istante di rilevamento di un fotone che occupa una qualsiasi posizione ordinale durante un intervallo temporale particolare.

La marcatura temporale può registrare l'istante di rilevamento con una risoluzione più fine della lunghezza dell'intervallo temporale.

Per ciascun pixel, la logica di elaborazione può comprendere un primo dispositivo di marcatura temporale ed un secondo dispositivo di marcatura temporale, ed il primo ed il secondo dispositivo di marcatura temporale possono essere utilizzati in modo alternato,

in modo che il primo dispositivo di marcatura temporale sia utilizzato per fornire una marcatura temporale durante alcuni intervalli temporali, ed il secondo dispositivo di marcatura temporale sia utilizzato per fornire una marcatura temporale durante altri intervalli temporali.

Per ciascun pixel, il segnale di rilevamento può comprendere un segnale di conteggio rappresentativo di un numero di eventi di rilevamento di fotoni.

Per ciascun pixel, la logica di elaborazione può essere atta a combinare segnali dalla pluralità di rivelatori per ottenere il segnale di rilevamento di pixel. Ad esempio, la logica di elaborazione può essere atta a sommare i segnali forniti dalla pluralità di rivelatori per ottenere il segnale di rilevamento di pixel.

Ciascun rivelatore può comprendere un unico rivelatore fotonico e/o rivelatore a fotodiodo, facoltativamente un Diodo a Valanga a Fotone Singolo ("Single Photon Avalanche Diode" - SPAD).

Ciascun pixel può comprendere una pluralità di Foto-Moltiplicatori di Silicio (Silicon Photon-Multiplier" - SiPM), ciascuno dei quali comprende una pluralità di rivelatori.

Il dispositivo può essere incluso in un chip, ad

esempio un chip CMOS.

Il dispositivo può inoltre comprendere una risorsa di elaborazione inclusa sul chip ed atta a determinare almeno un parametro tra:

l'istante in cui si verifica l'evento di rilevamento;

una posizione dell'evento di rilevamento;

un profilo del conteggio di pixel in funzione della posizione per l'evento di rilevamento;

una somma di tutti i segnali di rilevamento integrati (conteggi di dati spaziali) da uno o più pixel, per fornire, ad esempio, una stima dell'energia per l'evento di rilevamento.

L'evento di rilevamento può comprendere almeno un evento tra un evento di scintillazione, un evento di annichilazione di una particella, un evento di fluorescenza, o la ricezione di fotoni che nascono da un tale evento di scintillazione, evento di annichilazione di una particella o evento di fluorescenza.

Secondo un ulteriore aspetto indipendente dell'invenzione, si realizza un sistema di rilevamento comprendente una pluralità di dispositivi sensori come rivendicato o descritto nella presente, ciascuno dei quali è allineato con un materiale scintillatore, ed un processore per elaborare segnali di rilevamento e/o

segnali di rilevamento integrati ottenuti dai dispositivi sensori.

Il sistema può essere un sistema di rilevamento PET, MRI, di raggi X, di fisica delle particelle, di fotonica quantistica, o di biofotonica.

Secondo un ulteriore aspetto indipendente dell'invenzione, si realizza un procedimento di rilevamento fotonico, comprendente l'acquisizione di un rispettivo segnale di rilevamento da ciascun pixel facente parte di una pluralità di pixel per ciascun intervallo facente parte di un serie di intervalli temporali, in cui ciascun pixel comprende una pluralità di rivelatori fotonici, per ciascun intervallo temporale, la combinazione dei segnali di rilevamento da ciascun pixel per produrre un segnale di rilevamento combinato per questo intervallo temporale, e l'identificazione del verificarsi di un evento di rilevamento durante un intervallo temporale particolare in funzione di un valore del segnale di rilevamento combinato almeno per questo intervallo temporale.

Secondo un altro aspetto indipendente dell'invenzione, si realizza un procedimento di rilevamento fotonico, comprendente l'acquisizione di un rispettivo segnale di rilevamento per ciascun pixel facente parte di una pluralità di pixel per ciascun intervallo fa-

cente parte di una serie di intervalli temporali, in cui ciascun pixel comprende una pluralità di rivelatori fotonici; per ciascun pixel, la memorizzazione di almeno un segnale di rilevamento e/o di almeno una marcatura temporale da almeno un intervallo temporale precedente e l'identificazione del verificarsi di un evento di rilevamento durante un intervallo temporale particolare, in cui, per ciascun pixel, l'almeno un segnale di rilevamento memorizzato e/o l'almeno una marcatura temporale comprendono almeno un segnale di rilevamento e/o almeno una marcatura temporale per almeno un intervallo temporale che precede, durante, o che segue l'identificazione del verificarsi dell'evento di rilevamento.

Secondo un ulteriore aspetto indipendente dell'invenzione, si realizza un sensore per il rilevamento asincrono di un impulso di fotoni composto da una matrice di pixel di mini-fotomoltiplicatori di silicio ("mini-Silicon PhotoMultiplier" - mini SiPM). Ciascun pixel contiene una matrice di rivelatori di singoli fotoni disposti sotto forma di un fotomoltiplicatore di silicio ("Silicon PhotoMultiplier" - SiPM) ed una logica di elaborazione sincronizzata da una forma d'onda di orologio globale . La logica genera due uscite: (1) un conteggio digitale di fotoni che conteg-

gia tutti i fotoni incidenti sulla superficie del pixel entro il periodo di orologio, (2) una 'marcatura temporale' digitale che rappresenta l'istante di arrivo del primo fotone rispetto al periodo di orologio presente. Sono possibili varie disposizioni di rivelatori di pixel (come quella del brevetto FBK), dSiPM o disposizioni di conteggio di fotoni multi-pixel ("Multi-Pixel Photon Counting" - MPPC) con una logica di conteggio che fornisce un singolo conteggio digitale di fotoni.

Ciascun pixel dell'ulteriore forma di attuazione può includere un buffer primo entrato - primo uscito ("First-In First-Out" - FIFO) in cui i conteggi di fotoni digitali e le marcature temporali sono inseriti e sono traslati ad ogni ciclo dell'orologio globale. Il FIFO è un componente fondamentale del pixel poiché permette di conservare una storia locale dell'energia e della temporizzazione dei fotoni rilevati finché un meccanismo globale non valida un evento. Il FIFO di tutti i pixel può essere bloccato (congelato) all'asserzione di un segnale FREEZE globale, in modo che non vengano forniti ulteriori ingressi al FIFO finché non viene abbassato il segnale FREEZE.

Ciascun pixel può includere un integratore che somma l'uscita di conteggio digitale di fotoni per un

intervallo temporale programmabile dall'asserzione del segnale FREEZE. Il conteggio integrato di fotoni è disponibile come terza uscita digitale dal mini-SiPM.

Ciascun pixel può includere uno o più circuiti generatori di marcatura temporale (ad esempio convertitori tempo - digitale) che possono attribuire una marcatura temporale al primo o al secondo o al terzo fotone e così via, o qualsiasi loro combinazione.

Le uscite dei pixel possono essere sommate in modo gerarchico sotto il controllo di un orologio globale. Le uscite di coppie di 'celle' vicine possono essere sommate durante ciascun periodo di orologio e la somma può costituire l'uscita verso il livello seguente di gerarchia. La 'cella' più semplice è il pixel che fornisce in uscita il numero totale di fotoni incidenti sulla sua superficie (tipicamente un piccolo multiplo di $100\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$). La somma gerarchica delle uscite dei pixel crea una singola uscita digitale di livello superiore dal sensore che rappresenta il numero totale di fotoni incidenti entro un periodo di campionamento sull'intera superficie del sensore (ad esempio $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$). Il numero di stadi di somma gerarchica è definito da $\log_2(\text{numero di pixel in un sensore})$. La rete di somme gerarchiche può essere realizzata sotto forma di una rete spaziale ad albero ad H (H-tree) per mantene-

re ritardi di instradamento uguali tra tutte le celle. Le operazioni di somma possono di preferenza essere realizzate entro l'area del sensore in modo da conservare la massima area complessiva sensibile ai fotoni. Sono anche possibili altri approcci di somma globale che aggregano l'uscita di tutti i pixel. La distribuzione dell'orologio globale può anche assumere la stessa disposizione ad albero ad H nella direzione opposta (dall'ingresso del sensore al pixel) per minimizzare disallineamenti temporali tra i pixel attraverso la matrice.

L'uscita digitale di livello superiore può essere confrontata con una soglia (ad esempio, una parola digitale di ingresso o 'soglia di attivazione') in ciascun ciclo di orologio per produrre una sequenza di attivazione ("trigger") ad un solo bit, ad esempio asserito se l'uscita del sensore si trova sopra la soglia di attivazione ed altrimenti abbassato.

Quando viene attraversata la soglia di attivazione ed un segnale FREEZE viene asserito e retroalimentato alla matrice di pixel, ciò può fare in modo che i FIFO dei pixel siano inibiti insieme all'integrazione dei conteggi di fotoni di pixel per un numero variabile di periodi di orologio dopo l'asserzione del segnale FREEZE. In un'applicazione PET / MRI, l'attivazione

del sensore può dipendere dall'arrivo di un fotone gamma con energia sufficiente che incide sullo scintillatore. La nuvola di fotoni emessi nel visibile può essere conteggiata dal sensore e confrontata con una soglia per permettere di distinguere il conteggio di buio del sensore da un breve impulso di fotoni (della durata tipica di 160 ns) generata da una scintillazione gamma in un cristallo scintillatore disposto sopra il sensore. I FIFO dei pixel possono permettere che vi sia un certo numero di cicli di orologio di latenza tra l'arrivo del fotone gamma e la generazione del segnale di attivazione (che richiede la somma di tutti i fotoni che giungono sul sensore) senza perdita di marcature temporali o conteggi che si presentano subito dopo l'evento gamma.

Le marcature temporali digitali ed i conteggi di fotoni integrati (indicati ad esempio come 'dati di pixel') possono essere letti da ciascun pixel. Ciò può essere ottenuto generando un segnale di abilitazione di pixel in conseguenza del quale i dati di pixel sono posizionati su un bus di uscita del sensore. Il segnale FREEZE di pixel può essere abbassato quando sono stati letti i dati da tutti i pixel nel sensore.

Qualsiasi caratteristica in un aspetto dell'invenzione può essere applicata ad altri aspetti dell'in-

venzione, in qualsiasi combinazione appropriata. Ad esempio, caratteristiche del dispositivo possono essere applicate a caratteristiche del procedimento e viceversa.

BREVE DESCRIZIONE DEI DISEGNI

Alcune forme di attuazione saranno ora descritte, soltanto a titolo di esempio non limitativo, e sono illustrate nelle figure seguenti, nelle quali:

la figura 1 riporta un diagramma schematico di un sistema di generazione di immagini a PET noto;

la figura 2 riporta un diagramma schematico che mostra in una vista di insieme l'architettura di un chip sensore secondo una forma di attuazione;

la figura 3 riporta un'illustrazione schematica di un pixel nella forma di attuazione illustrata nelle figure 1 e 2;

la figura 4 riporta un diagramma schematico che mostra una logica di elaborazione di un MiniSiPM incluso nel pixel illustrato nella figura 3;

la figura 5 riporta un diagramma schematico che illustra più in dettaglio una logica di elaborazione del pixel illustrato nella figura 3;

la figura 6 riporta un diagramma temporale, ed un istogramma di conteggi totali di fotoni ottenuti prima e durante un evento di rilevamento;

la figura 7 riporta un diagramma temporale più dettagliato;

le figure 8a ed 8b mostrano sistemazioni alternative della logica di pixel;

le figure da 9 ad 11 riportano delle illustrazioni di strutture a semiconduttore formanti un logica di elaborazione secondo alcune forme di attuazione;

la figura 12 riporta un grafico normalizzato dell'energia in funzione delle occorrenze ottenuto da misure utilizzando la forma di attuazione illustrata nella figura 2, e comprende un picco interpolato; e

la figura 13 riporta un grafico del numero di occorrenze in funzione del tempo ottenuto da codici TDC generati da un singolo pixel della forma di attuazione illustrata nella figura 2, confrontato con un sistema di riferimento e con una media di trame.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA

L'architettura di livello superiore di un dispositivo sensore, sotto forma di un chip sensore 10, secondo una forma di attuazione è illustrata schematicamente nella figura 2. Nell'uso di un sensore per PET, il chip 10 è posizionato rispetto ad un cristallo scintillatore (non illustrato) in modo che fotoni gamma generati dall'annichilazione di un positrone nel cristallo scintillatore siano rilevati dal chip senso-

re 10. Un certo numero di cristalli scintillatori e chip rivelatori associati 10 può essere disposto in una configurazione cilindrica simile a quella illustrata nella figura 1.

Il chip 10 costituisce un sensore di 92k SPAD, 16×8 pixel, in una tecnologia CMOS CIS a bassa tensione a 0,13 μm , con ciascun pixel che comprende quattro mini-SiPM da 180 SPAD ciascuno, contatori nel pixel, e Convertitori Tempo - Digitale ("Time to Digital Converter" - TDC). Quest'architettura di sensore può fornire una capacità di istogramma di energia in tempo reale di 100M campioni/s ed un discriminatore sul chip per un riconoscimento di eventi gamma. La struttura del chip è descritta più in dettaglio con riferimento alle figure da 2 a 5.

Il chip sensore 10 comprende una matrice di pixel 20 che sono collegati ad un dispositivo di monitoraggio di eventi che comprende un circuito logico sotto forma di un discriminatore 22. Il discriminatore 22 è anche collegato a registri di configurazione 24 che memorizzano i valori di vari parametri di configurazione, e ad un decodificatore di indirizzo digitale di riga e di colonna 26 che permette la lettura di segnali di rilevamento da singoli pixel 20, se lo si desidera. È anche previsto un decodificatore SRAM 28 che

può essere utilizzato per abilitare / inibire selettivamente ciascuno SPAD, se lo si desidera. Il dispositivo comprende anche un bus di uscita del sensore 30 che include componenti di serializzatore e MUX e che permette la trasmissione di dati di rilevamento ed altri dati ad un processore centrale (non illustrato).

Il discriminatore 22 comprende un orologio (non illustrato) che fornisce un segnale di orologio CLKBIN, con una frequenza operativa di 100 MHz. Il chip del sensore è progettato per lavorare in sincronismo con il segnale di orologio CLKBIN.

Ciascun pixel 20 comprende una logica di elaborazione, come è discusso più in dettaglio nel seguito con riferimento alle figure da 3 a 5. I pixel 20 sono collegati al discriminatore 22 attraverso una struttura ad albero, sotto forma di un albero ad H gerarchico 32 che è sovrapposto sulla matrice di pixel.

La struttura ad albero ad H assicura che, dalla periferia, l'orologio principale CLKBIN ed i segnali a criticità temporale siano forniti ai pixel 20 con ritardi di propagazione equalizzati. Nella direzione opposta, un sommatore è disposto in ciascun nodo della struttura ad albero ad H e tutti i segnali di rilevamento di pixel, in questo caso sotto forma di conteggi di pixel, in ciascun periodo di orologio sono sommati

dal sommatore distribuito risultante. Così un segnale di rilevamento combinato, in questo caso un conteggio di fotoni a livello di chip, è generato per ciascun intervallo temporale del periodo di orologio. Un intervallo temporale può essere indicato come un intervallo di tempo di rilevamento.

Una caratteristica della forma di attuazione illustrata nella figura 2 consiste nel fatto che il discriminatore 22 controlla il funzionamento del chip in modo che abbia una tra due modalità, indicate in questo caso come una modalità inattiva ed una modalità di monitoraggio di eventi, in funzione del fatto che si sia verificato un evento di rilevamento (in questo caso, un evento gamma). L'uso di due modalità fornisce le informazioni temporali, spaziali e di energia richieste relative a ciascun fotone gamma rilevato, evitando nello stesso tempo la generazione di tali informazioni per conteggi di buio degli SPAD. Un'ulteriore caratteristica della forma di attuazione consiste nel fatto che il discriminatore 22 determina se si è o non si è verificato un evento di rilevamento per un intervallo di tempo (intervallo temporale) di rilevamento particolare in funzione del valore del segnale di rilevamento combinato su tutti i pixel per questo intervallo di tempo di rilevamento.

Nell'attesa di un evento gamma nella modalità inattiva, vengono conteggiati tutti i fotoni rilevati da ciascun pixel durante un periodo, di 10 ns (definito dall'orologio distribuito nell'albero ad H, denominato CLKBIN). Questi conteggi di pixel sono sommati gerarchicamente per produrre un unico totale a 16 bit che rappresenta il flusso fotonico istantaneo che incide sui pixel del sensore, con una risoluzione temporale di 10 ns. Questi dati di istogramma in tempo reale sono resi disponibili all'esterno del chip attraverso un bus di uscita parallelo a 16 bit, mentre un discriminatore sul chip 22 applica una logica che confronta i conteggi di fotoni per due intervalli consecutivi con due soglie configurabili (Th1, Th2) per distinguere un evento gamma (che può, ad esempio, produrre circa 1.000 fotoni in una finestra di 200 ns) da rumore (conteggi di buio e fotoni spuri), come illustrato schematicamente nel diagramma di flusso del processo di discriminazione fornito nella figura 2.

Se il conteggio totale (Tot cnt) è superiore alla soglia appropriata (Th2), allora il discriminatore 22 considera la luce che incide al momento sul sensore come un evento valido di scintillazione gamma ed il dispositivo passa dalla modalità inattiva alla modalità di monitoraggio di eventi. I segnali di rilevamento

sono quindi integrati finché il tempo (T_{mr}) non è uguale al periodo di integrazione ($IntTime$), come descritto più avanti.

È possibile utilizzare una qualsiasi altra procedura di applicazione di soglia appropriata. Utilizzando una procedura di applicazione di soglia o altra procedura basata sul segnale di rilevamento combinato ottenuto da tutti i pixel, il discriminatore 22 è in grado di ridurre l'impatto di falsi segnali, o funzionamento difettoso, di singoli pixel o singoli rivelatori fotonici, nel determinare quando si è verificato un evento di rilevamento.

Le differenze nel funzionamento tra la modalità inattiva, quando si attende un evento di rilevamento, e la modalità di monitoraggio di eventi, dopo che è stato rilevato un evento, sono descritte più in dettaglio nel seguito. In primo luogo, sono ulteriormente descritte la struttura dei pixel e la logica di elaborazione associata.

Un pixel 20 è illustrato schematicamente nella figura 3. Ciascun pixel 20 è composto da quattro SiPM (MiniSiPM) digitali indipendenti 40a, 40b, 40c, 40d, e da una logica di elaborazione comprendente un circuito di gestione dati ("Data Managing Circuit" - DAMAC) comune 42 responsabile del conteggio dei fotoni, della

marcatura temporale e della trasmissione dei dati.

Ciascun MiniSiPM 40a, 40b, 40c, 40d comprende una matrice, a nido d'ape, di 12×15 SPAD 44 digitalizzati singolarmente insieme con la rispettiva logica di elaborazione 46a, 46b, 46c, 46d ed un circuito di compressione. Gli SPAD 44 in questa forma di attuazione hanno un diametro attivo di $16,27 \mu\text{m}$.

La logica di elaborazione 46a di uno dei MiniSiPM 40a è rappresentata schematicamente nella figura 4, e comprende un 'front-end' 50 per ciascuno SPAD, un circuito di compressione spaziale temporale 52, e dei contatori 54. Entro i MiniSiPM 40a, tutti i catodi degli SPAD sono collegati ad una linea di polarizzazione comune, mentre i loro anodi sono collegati singolarmente ad un transistor di inibizione ("quenching" nella letteratura tecnica anglosassone) passivo M1. L'uscita dello SPAD è digitalizzata da un invertitore a trigger di Schmitt in modo da impedire che la lenta ricarica dello SPAD 44 influenzi il circuito di compressione, mentre le SRAM 6T sono utilizzate per inhibire SPAD rumorosi 44.

Infine, il circuito di compressione 52 combina le uscite dei 180 SPAD in un singolo canale (Vpulse) che fornisce un breve impulso per ciascun fotone. Gli impulsi relativamente lunghi degli SPAD (decine di ns)

sono dapprima sottoposti ad un'operazione logica di OR in gruppi di tre (compressione spaziale) e quindi compressi nel tempo dal monostabile.

La velocità massima del canale di uscita V_{pulse} è definita dalla larghezza di impulso del monostabile, che può essere ridotta fino a 250 ps nella presente implementazione. V_{pulse} è quindi alimentato al DAMAC 42, che costituisce una parte della logica di elaborazione di pixel, per mezzo di un circuito di campionamento di intervallo temporale.

Il DAMAC 42, che fa parte della logica di elaborazione di pixel, è illustrato schematicamente più in dettaglio nella figura 5. Il DAMAC 42 comprende due convertitori tempo - digitale ("Time to Digital Converter" - TDC) a 12 bit 60a, 60b, due contatori 62a, 62b, un sommatore gerarchico 64 operante in modo da sommare i conteggi di fotoni ricevuti per ciascuno dei quattro SiPM 40a, 40b, 40c, 40d, un FIFO di marcatura temporale 66, un altro FIFO 68 che funziona anche, in parte, come accumulatore durante la modalità di monitoraggio di eventi, ed un'uscita verso un bus di comunicazione. L'uscita del sommatore gerarchico 64 è anche collegata ad un albero sommatore gerarchico del chip che collega le uscite di ciascuno dei pixel 20 del chip 10, come è discusso più in dettaglio nel se-

guito.

Ciascun DAMAC 42 è atto a ricevere il segnale di orologio principale CLKBIN, che opera come segnale di orologio globale per ciascuno dei pixel 20.

Nel funzionamento, ciascun periodo dell'orologio principale CLKBIN è assegnato ad intervalli temporali A o B, selezionando uno dei due contatori 62a, 62b e dei due TDC 60a, 60b, operanti in una modalità a funzionamento alternato. Durante ciascun intervallo temporale, mentre gli impulsi dei MiniSiPM sono accumulati in un primo contatore (ad esempio il contatore A) 62a, l'uscita dell'altro contatore (il contatore B) è disponibile per il sommatore gerarchico nel pixel (sommatore 1, 2 e 3), che calcola il numero totale di fotoni nel pixel. In modo simile, uno dei due TDC (ad esempio il TDC A, 60a) misura il tempo di arrivo del primo fotone nel pixel nell'intervallo corrente, mentre l'altro (TDC B, 60b) blocca il valore campionato dell'intervallo precedente. Le uscite sia del sommatore sia del TDC dell'intervallo temporale precedente sono inserite nei rispettivi FIFO 66, 68 (o in registri FIFO interni separati di un unico FIFO in una forma di attuazione alternativa). Nel periodo di orologio seguente, le funzioni degli intervalli temporali A e B sono scambiate. In questo modo, non viene perso

nessun impulso generato dai Mini-SiPM 40a, 40b, 40c, 40d durante il trasferimento di dati e azzeramento.

Il funzionamento dei FIFO 66, 68 è descritto nel paragrafo precedente con riferimento alla modalità innattiva. In questa modalità, i FIFO assicurano che segnali di rilevamento, comprendenti i conteggi di fotoni, ed informazioni di marcatura temporale siano conservati per diversi periodi di orologio dopo che sono stati misurati. Il funzionamento del FIFO cambia quando il chip entra nella modalità di monitoraggio di eventi in risposta al segnale di rilevamento combinato da tutti i pixel che supera la soglia/le soglie ed al fatto che un evento è quindi rilevato dal discriminatore 22.

Quando viene rilevato un evento, il discriminatore 22 genera un'attivazione e passa nella modalità di integrazione. Il segnale di attivazione, che può essere indicato come un segnale di bloccaggio, è distribuito alla logica di elaborazione di ciascuno dei pixel 20, ed in risposta ciascun pixel entra nella modalità di monitoraggio di eventi, il che significa che ciascun pixel inizia ad accumulare conteggi, mentre i FIFO dei TDC 66 saranno bloccati. I FIFO 66, 68 devono conservare i valori memorizzati nei FIFO 66, 68 nell'intervallo temporale in cui è stato rilevato l'e-

vento, considerando la latenza per generare e propagare l'attivazione. I FIFO compensano così la latenza di passaggio attraverso l'albero sommatore ed il discriminatore. I FIFO assicurano che tutti i dati relativi ad un evento particolare siano conservati (in questo caso sia il numero di fotoni sia dati di marcatura temporale), e l'integrazione inizia con i valori di intervallo che hanno provocato l'attivazione del discriminatore 22, assicurando che siano utilizzati tutti i conteggi di fotoni associati con un evento particolare, anche se compaiono all'inizio dell'evento.

Quando è comandata dal segnale di attivazione, distribuito in sincronismo con l'orologio, la logica di elaborazione di pixel, sotto forma dei DAMAC 42, accumula gli impulsi degli SPAD conteggiati in ciascun ciclo di orologio durante il periodo di integrazione, utilizzando l'accumulatore (che in questo caso fa parte del FIFO 68, benché possa essere predisposto sotto forma di un componente separato). Come sarà descritto, ciascun blocco 52, 54 di Interfaccia e Contatore dei Mini-SiPM ("Mini-SiPM Interface and Counter" - MIC) 52, 54 contiene un albero OR per combinare le uscite dei singoli SPAD in un'unica successione di impulsi, con dispositivi monostabili dopo il primo stadio OR che svolgono una funzione di accorciamento degli im-

pulsi per evitare che impulsi sovrapposti si oscurino reciprocamente. Il contatore 54, anch'esso nel blocco MIC, somma gli impulsi degli SPAD generati durante ciascun ciclo di orologio, realizzato utilizzando la coppia di contatori a 'ripple' funzionanti in una modalità ad azione alternata, in modo che uno stia integrando mentre l'altro viene letto ed azzerato. Il DAMAC a livello di pixel 42 somma quindi le uscite dei contatori dei quattro Mini-SiPM, e l'accumulatore esegue l'integrazione.

Infine, quando si raggiunge il termine del tempo di integrazione programmabile (IntTime), l'accumulatore viene anche bloccato ed i conteggi integrati per ogni pixel ed i valori dei TDC sia del primo sia del secondo intervallo integrati sono letti dal discriminatore 22.

In alternativa, il discriminatore interno 22 può essere bypassato a favore di un discriminatore esterno o altra risorsa di elaborazione, come un processore centrale, poiché i segnali sia di integrazione sia di lettura possono essere forniti esternamente.

Quando sono letti, i valori degli accumulatori dei singoli pixel forniscono una 'immagine' di intensità che mostra la distribuzione spaziale di luce di scintillazione attraverso il sensore, permettendo di

determinare il punto di scintillazione mediante un'elaborazione fuori dal chip. In modo simile, i valori possono essere sommati per calcolare l'energia complessiva del fotone gamma incidente. Come indicato in precedenza, i TDC nei pixel sono disposti in una coppia ad azione alternata, permettendo che venga generata un'unica marcatura temporale per ogni ciclo di orologio senza un tempo morto intermedio. Questi valori dei TDC sono posti nel loro FIFO 66 che è bloccato all'inizio dell'integrazione, conservando la marcatura temporale dei primi fotoni cruciali nell'impulso di scintillazione, pronte per essere lette insieme con i dati spaziali come già indicato in precedenza.

Oltre ad ottenere l'immagine di intensità, il discriminatore 22, o un discriminatore esterno fuori dal chip o altra risorsa di elaborazione, può anche continuare, durante la modalità di monitoraggio di eventi, a ricevere il segnale di rilevamento combinato che rappresenta la somma di segnali di rilevamento (in questo caso numeri di fotoni) che è stata utilizzata per determinare inizialmente il verificarsi dell'evento. Così, un istogramma temporale dei conteggi può essere monitorato esternamente in tempo reale, ed un'analisi di questi dati può permettere la filtrazione di falsi eventi ed il rilevamento di eventi gamma multi-

pli simultanei o altri eventi. Questa analisi può anche essere utilizzata per determinare un tipo di occorrenza, o altra proprietà, di un evento, ad esempio interpolando i dati in base ad un opportuno modello.

Un diagramma temporale, ed un istogramma di conteggi totali di fotoni ottenuti prima e durante un evento di rilevamento, sono forniti nella figura 6 a titolo illustrativo. Si può vedere che la determinazione dell'occorrenza di un evento di rilevamento, illustrata nel diagramma come decisione di validazione, avviene un certo tempo dopo l'inizio dell'impulso. Tuttavia, l'uso dei FIFO, e l'uscita continua del segnale di rilevamento combinato, assicurano che sia possibile utilizzare tutti i dati di conteggio di pixel pertinenti, incorporandoli nell'istogramma dell'evento. Un ulteriore diagramma temporale dettagliato è fornito nella figura 7 per riferimento.

Nella forma di attuazione illustrata nelle figure da 2 a 5, l'elaborazione di segnali di rilevamento e di dati di marcatura temporale associati con un evento di rilevamento può essere effettuata fuori dal chip, ad esempio in un processore centrale o altra risorsa, con dati pertinenti forniti dal chip attraverso un bus di comunicazione. In forme di attuazione alternative, questa elaborazione o una qualsiasi parte desiderata

di questa elaborazione può essere eseguita da un processore disposto sul chip, ed i risultati di tale elaborazione possono essere forniti in uscita dal chip come desiderato. Esempi di tale elaborazione includono, ma senza carattere limitativo, il calcolo della media o altra elaborazione combinata di dati di marcatura temporale per tutti i pixel per determinare l'istante in cui si è verificato l'evento, l'analisi di profili di conteggio di pixel in funzione del tempo, l'elaborazione dei dati di conteggio totali per ciascun pixel per ottenere dati di immagine e/o per determinare la posizione in cui si è verificato l'evento.

Una caratteristica della forma di attuazione illustrata nelle figure da 2 a 5 consiste nel fatto che i componenti della logica di elaborazione di ciascun pixel sono posizionati in un'area logica del pixel disposta in posizione centrale, come è illustrato schematicamente nella figura 8b. In forme di attuazione alternative, i singoli SPAD possono essere circondati da SPAD come illustrato nella figura 8a, ma la disposizione illustrata nella figura 8b può permettere un miglior fattore di riempimento. Il fattore di riempimento può anche essere migliorato utilizzando una condivisione del pozzo ("well" nella letteratura tecnica

anglosassone) di catodo come illustrato nella figura 9, che mostra (a) una vista in pianta, e (b) una vista in sezione trasversale che rappresentano singoli SPAD circondati da una logica in una tecnologia di generazione di immagini CMOS da 130 nm, e nella figura 10, che mostra (a) la sistemazione di un SiPM condiviso con canale logico, e (b) una vista in sezione trasversale che mostra la struttura del dispositivo. La disposizione illustrata nelle figure da 8b a 10 permette di realizzare 720 (4×180) SPAD in un'area di pixel compatta di $0,57 \times 0,61 \text{ mm}^2$ insieme con l'elettronica associata. Tuttavia, si deve aver cura, in tecnologie CMOS a bassa tensione, di garantire che l'alta tensione applicata sul catodo NWELL non provochi un cedimento di giunzioni parassite, il che è risolto nella presente con l'uso di un anello di protezione "EPI" non drogato per evitare una scarica laterale come illustrato nella figura 11a. Altri approcci che possono essere utilizzati in forme di attuazione alternative sono illustrati nelle figure 11b ed 11c.

Il sensore della forma di attuazione illustrata nelle figure da 2 a 5 è stato verificato con un cristallo scintillatore LYSO rivestito di Teflon di $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}$ irradiato da una sorgente gamma Na22 da 370 kBq, 511 keV. Il sistema ha fornito una risoluzione di

energia di 13,1% FWHM ("Full Width at Half Maximum" - larghezza a metà altezza) a 20°C, come è illustrato nella figura 12, ed una FWHM migliorata di 11,3% con raffreddamento a -20°C e con l'uso ad una polarizzazione maggiore degli SPAD di 14,5 V. E' stato utilizzato un laser impulsato da 70 ps per misurare la risoluzione temporale del sensore, azionato ad una bassa potenza di emissione con un diffusore per ridurre effetti di saturazione ("pile-up" nella letteratura tecnica anglosassone).

La figura 13 mostra un grafico di codici TDC generati da un singolo pixel, che presenta una FWHM di 263 ps, confrontato con un sistema di riferimento. Quando si calcola la media di tutti i codici TDC validi in una trama, la FWHM risultante è migliorata a 239 ps, dimostrando che l'architettura di TDC per pixel fornisce migliori prestazioni temporali rispetto alla marcatura temporale per colonna o per sensore. Il dispositivo può includere, in alcune forme di attuazione, una risorsa di elaborazione per elaborare dati di marcatura temporale ottenuti per tutti i pixel allo scopo di ottenere una determinazione più precisa dell'istante in cui si verifica un evento rispetto a quella che potrebbe essere ottenuta da dati di marcatura temporale per un singolo pixel. E' possibile ese-

guire una qualsiasi elaborazione combinata appropriata, e tale elaborazione non è limitata al calcolo della media.

La forma di attuazione illustrata nelle figure da 2 a 5 può permettere l'integrazione della somma di fotoni incidenti sull'intera superficie del sensore in brevi intervalli di tempo (definiti da una forma d'onda di orologio), e la disponibilità continua di questa somma in continuo all'uscita del sensore. La forma di attuazione descritta può fornire marcature temporali per ogni pixel, che sono posizionate in buffer FIFO per ogni pixel permettendo un accesso alla storia temporale di arrivi successivi di fotoni.

La forma di attuazione illustrata nelle figure da 2 a 5 può permettere la determinazione del tempo, dell'energia e della posizione spaziale di eventi attraverso l'architettura del sensore costituita da una matrice di pixel ed un'acquisizione con elevato grado di parallelismo del numero di fotoni rilevato e del tempo di arrivo di questi fotoni (con TDC multipli). Una tale matrice può operare come un unico rivelatore di grande area in cui il numero totale di fotoni rilevati è disponibile in tempo reale al livello superiore attraverso la rete di sommatore distribuiti.

La forma di attuazione illustrata nelle figure da

2 a 5 può anche permettere di distinguere eventi fotonici (come eventi gamma) da eventi di rumore. Gli SPAD operano in continuo ed in modo asincrono (gli SPAD sono auto-ricaricanti) ed il sensore è in grado di conteggiare in continuo i fotoni in intervalli temporali che sono utilizzati per la validazione di eventi fotonici. L'architettura del sensore è in grado di fornire, ad esempio, un numero globale di fotoni rilevati per ogni intervallo. Così la validazione di un possibile evento come un evento genuino di un tipo selezionato (ad esempio un evento gamma) può essere effettuata utilizzando algoritmi complessi basati su, o che prendono in considerazione, l'evoluzione temporale dei conteggi.

Benché il dispositivo sensore secondo la forma di attuazione illustrata nelle figure da 2 a 5 sia stato descritto con riferimento a misure per PET, il dispositivo sensore secondo forme di attuazione alternative non è limitato a tali misure. Ad esempio, forme di attuazione alternative possono essere predisposte per misure per MRI o per qualsiasi rilevamento asincrono di eventi fotonici, come nella fisica delle particelle, nelle analisi a raggi X o nella spettrometria, in cui devono essere determinati il tempo, l'energia e/o la posizione spaziale degli eventi.

Il dispositivo sensore non è limitato alla forma di attuazione descritta con riferimento alle figure da 2 a 5, e si comprenderà ad esempio che vari aspetti della funzionalità della forma di attuazione illustrata nelle figure da 2 a 5 possono essere implementati senza altri aspetti della funzionalità in forme di attuazione alternative. Ad esempio, in alcune forme di attuazione alternative, è possibile prevedere la memorizzazione temporanea di segnali di rilevamento di pixel in tempi prima dell'identificazione del verificarsi di un evento, ad esempio utilizzando uno o più FIFO di pixel, ma è possibile non prevedere un albero gerarchico o altra struttura per la combinazione dei segnali, e viceversa.

In forme di attuazione alternative, è possibile prevedere un qualsiasi altro mezzo appropriato di memorizzazione dati per memorizzare segnali di rilevamento di pixel, oltre a, o al posto di, FIFO di pixel. In modo simile, in forme di attuazione alternative, è possibile prevedere qualsiasi altra disposizione appropriata per combinare segnali di rilevamento di pixel differenti, oltre a, o al posto di, una struttura gerarchica di somicatori ad albero ad H. Ad esempio, in alcune forme di attuazione alternative, è possibile utilizzare un qualsiasi albero appropriato o altra

struttura che combini segnali corrispondenti allo stesso intervallo temporale e/o che fornisca ritardi di instradamento sostanzialmente uguali tra i nodi. In alternativa, in alcune forme di attuazione, la combinazione di segnali di rilevamento di pixel nello stesso intervallo temporale può essere eseguita da una risorsa di elaborazione in base a dati di intervallo temporale ricevuti associati con ciascun segnale di rilevamento di pixel, benché ciò possa essere meno efficiente rispetto all'uso di una struttura ad albero di sommatore distribuiti.

In forme di attuazione alternative, la funzionalità del dispositivo di monitoraggio di eventi per identificare il verificarsi di un evento può essere fornita, ad esempio, da un singolo componente o da una pluralità di componenti distribuiti, e tali componenti possono essere disposti localmente, ad esempio sullo stesso chip dei pixel, o a distanza, ad esempio come parte di una risorsa di elaborazione centrale.

Si comprenderà che la presente invenzione è stata descritta in precedenza puramente a titolo di esempio, e che varie modifiche di dettaglio possono essere apportate nell'ambito dell'invenzione.

Ogni caratteristica illustrata nella descrizione e (dove appropriato) nelle rivendicazioni e nei disegni

può essere prevista indipendentemente o in qualsiasi
combinazione appropriata.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo sensore per il rilevamento di fotoni, comprendente:

una pluralità di pixel, con ciascun pixel comprendente una pluralità di rivelatori fotonici ed una logica di elaborazione atta a fornire in uscita un rispettivo segnale di rilevamento per ciascun pixel per ciascun intervallo di una serie di intervalli temporali;

un combinatore atto, per ciascun intervallo temporale, a combinare il segnale di rilevamento di ciascun pixel per produrre un segnale di rilevamento combinato per questo intervallo temporale,

un dispositivo di monitoraggio di eventi atto ad identificare il verificarsi di un evento di rilevamento durante un intervallo temporale particolare in funzione di un valore del segnale di rilevamento combinato per almeno questo intervallo temporale.

2. Dispositivo secondo la rivendicazione 1, in cui il dispositivo sensore opera in accordo con una prima modalità prima dell'identificazione di un evento di rilevamento, ed è atto ad operare in accordo con una seconda modalità differente in risposta al fatto che il dispositivo di monitoraggio di eventi ha identificato il verificarsi di un evento di rilevamento.

3. Dispositivo secondo la rivendicazione 2, comprendente inoltre mezzi per ottenere un segnale di rilevamento integrato per ciascun pixel rappresentativo di segnali di rilevamento accumulati durante un periodo di integrazione nella seconda modalità.

4. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui, per ciascun pixel, la logica di elaborazione comprende almeno un dispositivo di marcatura temporale che è atto a fornire una marcatura temporale per registrare l'istante di rilevamento di uno o più fotoni da parte dei rivelatori di questo pixel, in cui facoltativamente la marcatura temporale registra l'istante di rilevamento con una risoluzione più fine della lunghezza dell'intervallo temporale; e

in cui il dispositivo comprende inoltre mezzi per determinare un tempo dell'evento da dati di marcatura temporale ottenuti da ciascun pixel della pluralità di pixel, ad esempio mediante calcolo della media di dati di marcatura temporale ottenuti dalla pluralità di pixel.

5. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre, per ciascun pixel, un mezzo di memorizzazione dati che è atto a memorizzare almeno un segnale di rilevamento e/o almeno una marcatura temporale per almeno un intervallo

temporale precedente per questo pixel; e

in cui, per ciascun pixel, il mezzo di memorizzazione dati è atto a memorizzare, al momento dell'identificazione del verificarsi di un evento di rilevamento, almeno un segnale di rilevamento e/o almeno una marcatura temporale per almeno un intervallo temporale che precede, durante, o che segue l'identificazione del verificarsi dell'evento di rilevamento.

6. Dispositivo secondo la rivendicazione 5, in cui, per ciascun pixel, il mezzo di memorizzazione dati comprende almeno un FIFO per memorizzare l'almeno un segnale di rilevamento e/o almeno un FIFO per memorizzare l'almeno una marcatura temporale.

7. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 2 a 6, in cui il dispositivo di monitoraggio di eventi è atto ad inviare uno o più segnali di controllo alla logica di elaborazione di ciascun pixel in risposta all'identificazione di un evento di rilevamento, per bloccare il funzionamento dell'almeno un FIFO di questo pixel mentre si trova nella seconda modalità e/o per controllare l'integratore per questo pixel in modo da accumulare il segnale di rilevamento integrato per il periodo di integrazione.

8. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il combinatore comprende

una struttura ad albero comprendente una pluralità di nodi in una pluralità di livelli, in cui la logica di elaborazione di pixel fornisce segnali di rilevamento di pixel ai nodi di radice della struttura ad albero e la struttura ad albero è configurata in modo che, in ciascun nodo a livelli sopra il nodo di radice, siano combinati segnali da almeno due nodi ad un livello inferiore della struttura ad albero.

9. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il combinatore comprende una struttura gerarchica ad albero di sommatore.

10. Dispositivo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre mezzi per ottenere, per ciascun evento di rilevamento, uno o più, facoltativamente ognuno, tra:

un profilo del segnale di rilevamento combinato per tutti i pixel in funzione del tempo durante il periodo di integrazione;

un segnale di rilevamento integrato per ciascun pixel, rappresentativo dei segnali di rilevamento accumulati da questo pixel durante il periodo di integrazione;

dati di marcatura temporale per ciascun pixel.

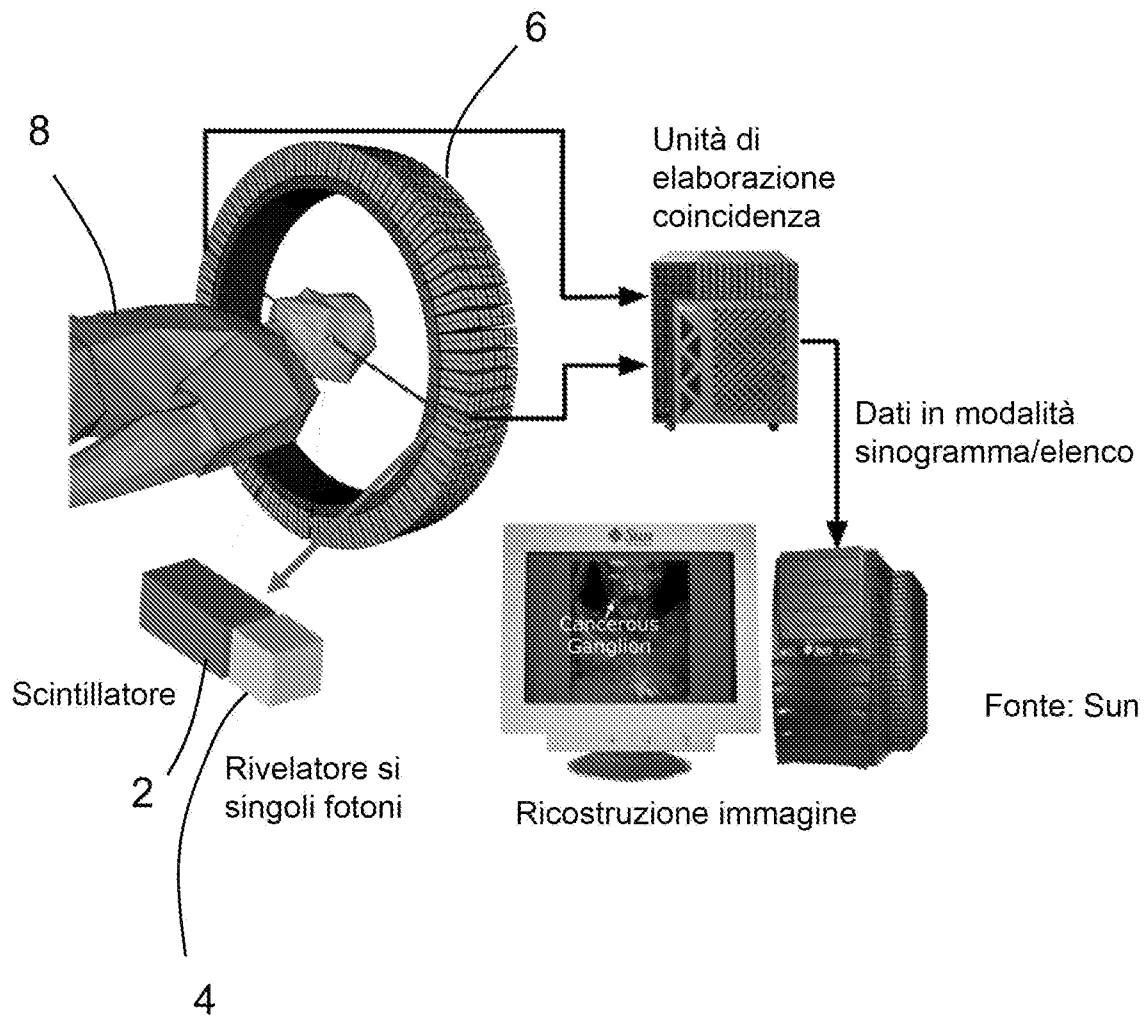


FIG. 1
(TECNICA ANTERIORE)

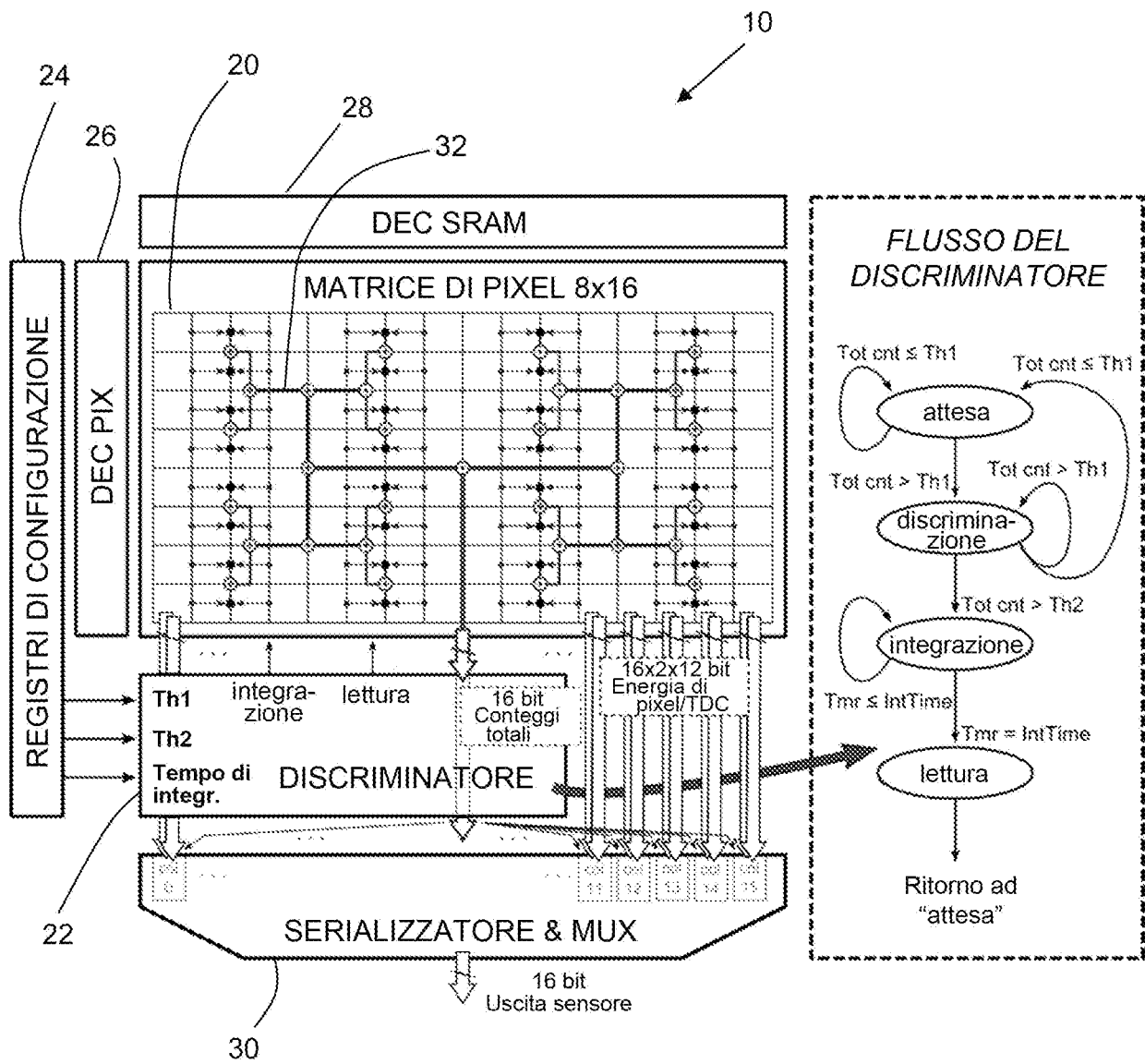


FIG. 2

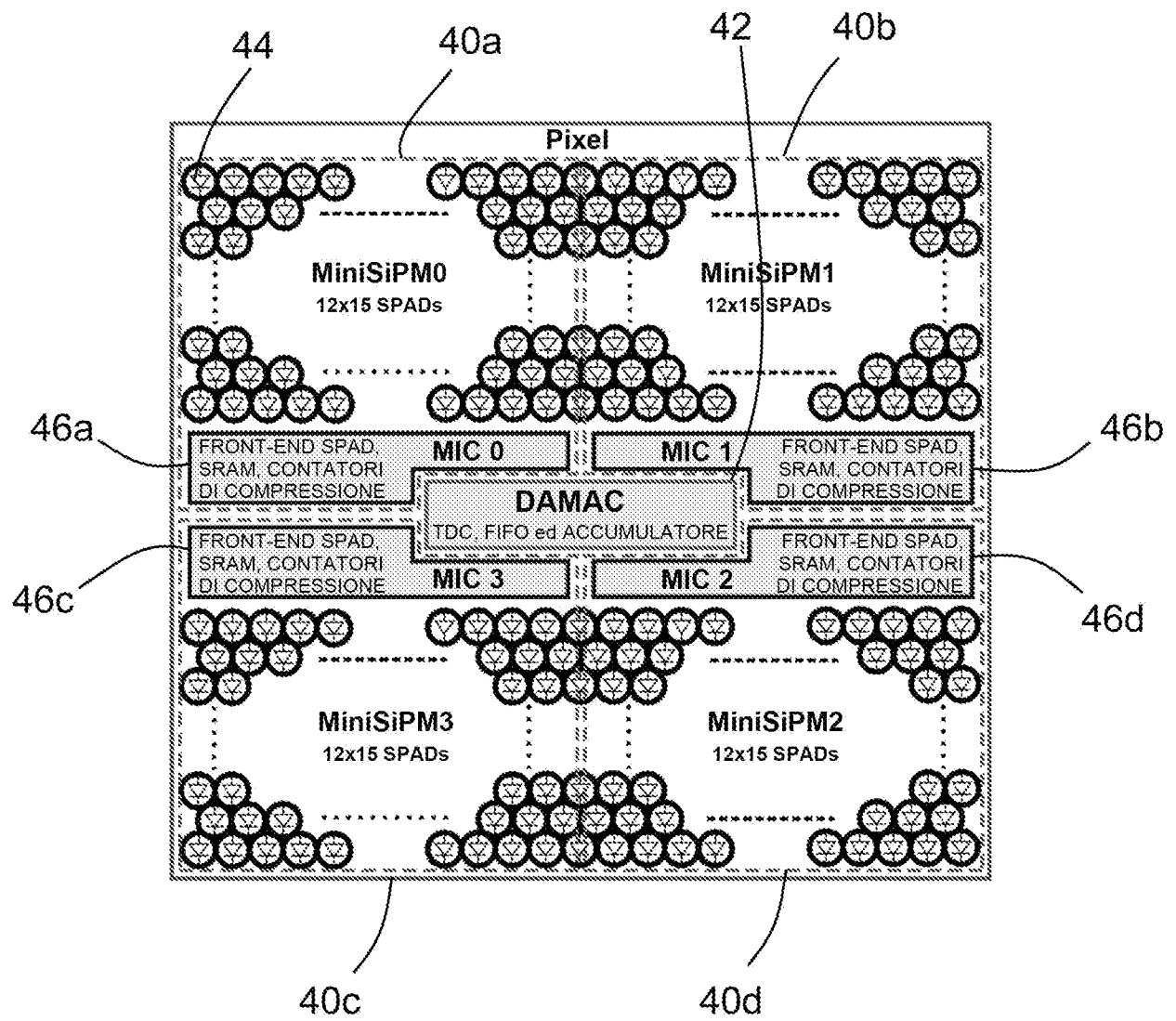


FIG. 3

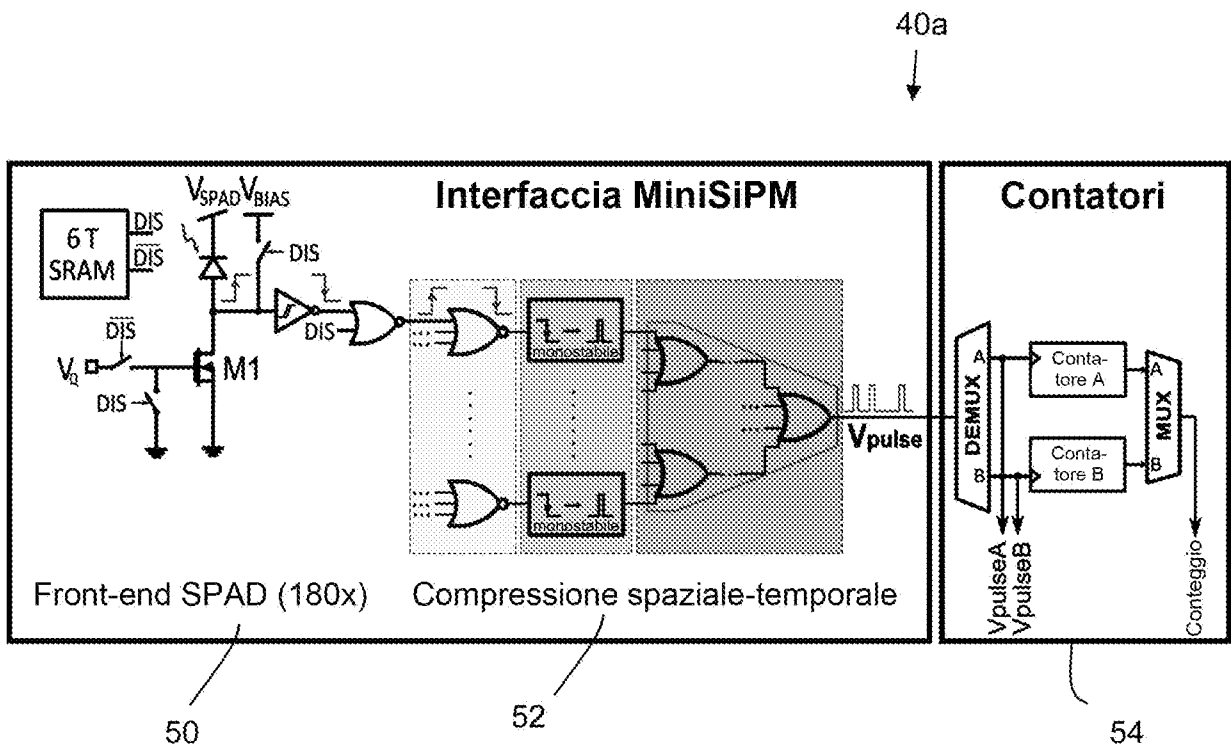


FIG. 4

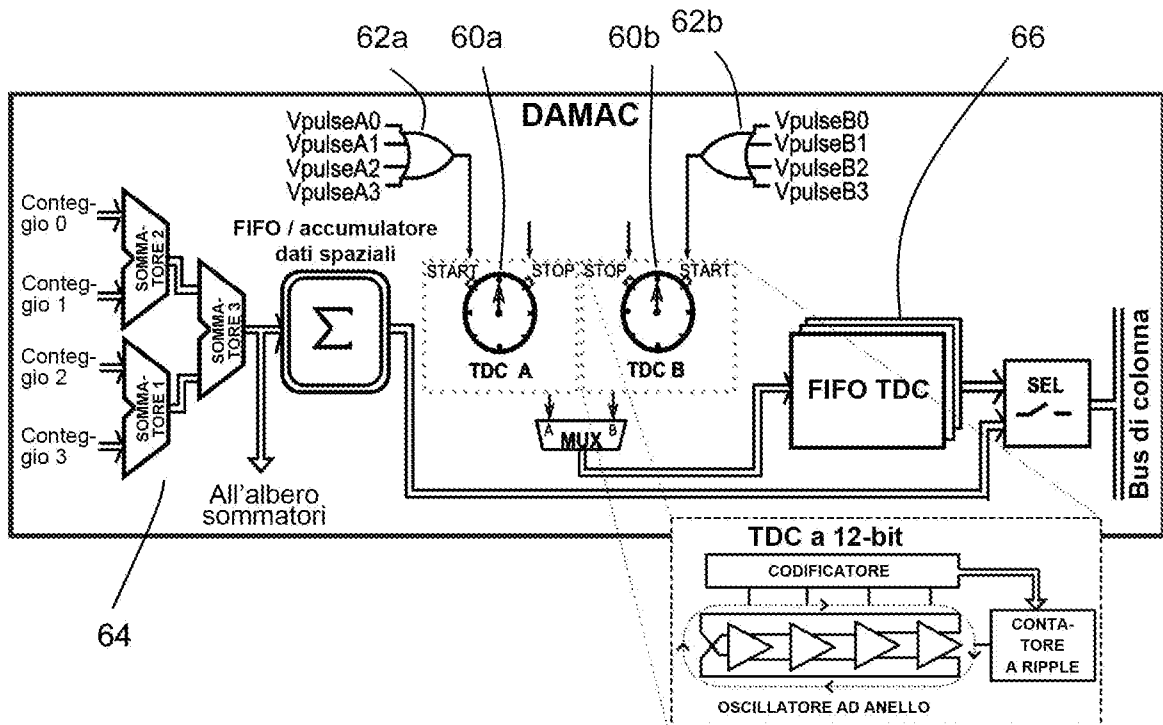


FIG. 5

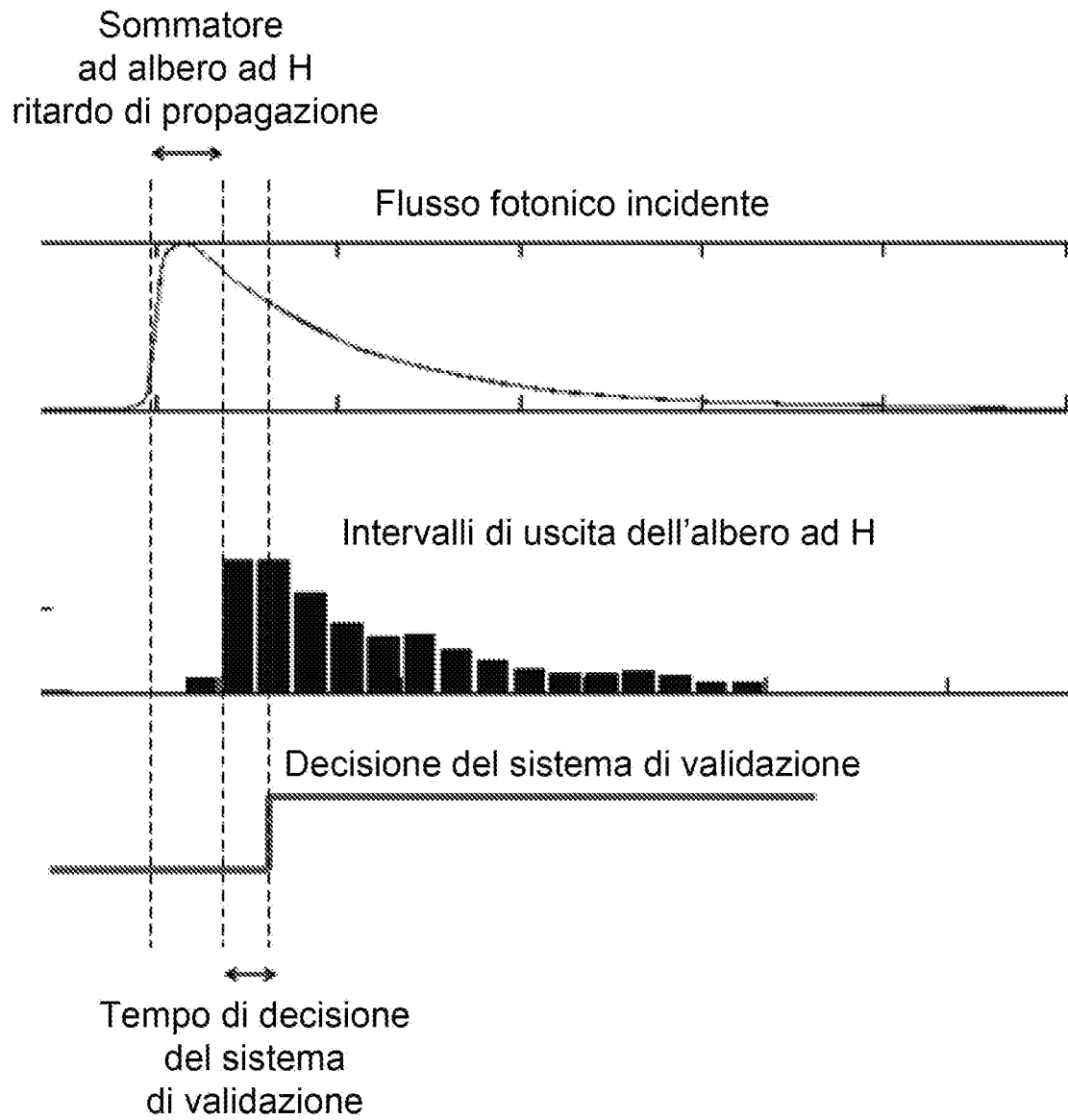


FIG. 6

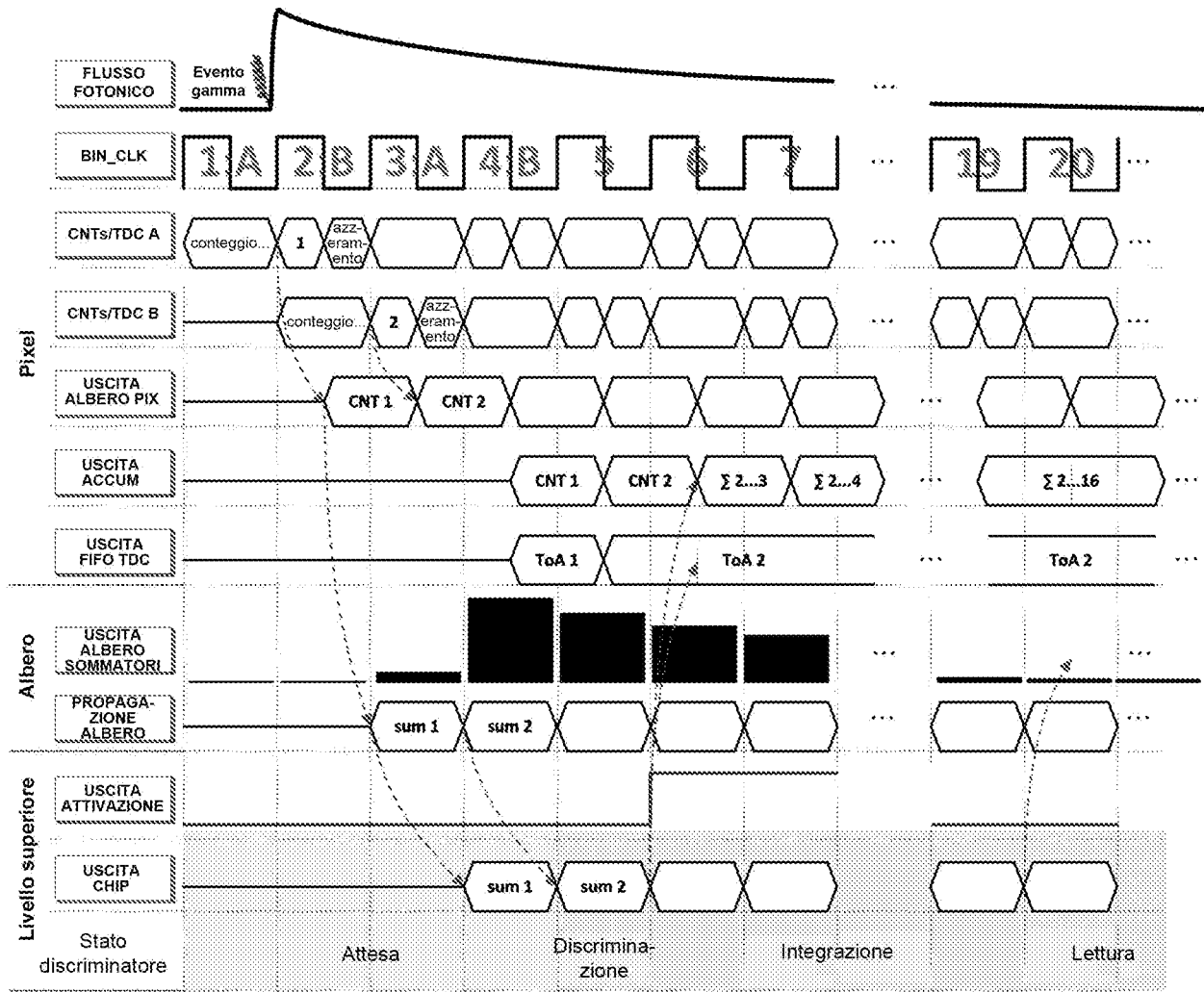


FIG. 7

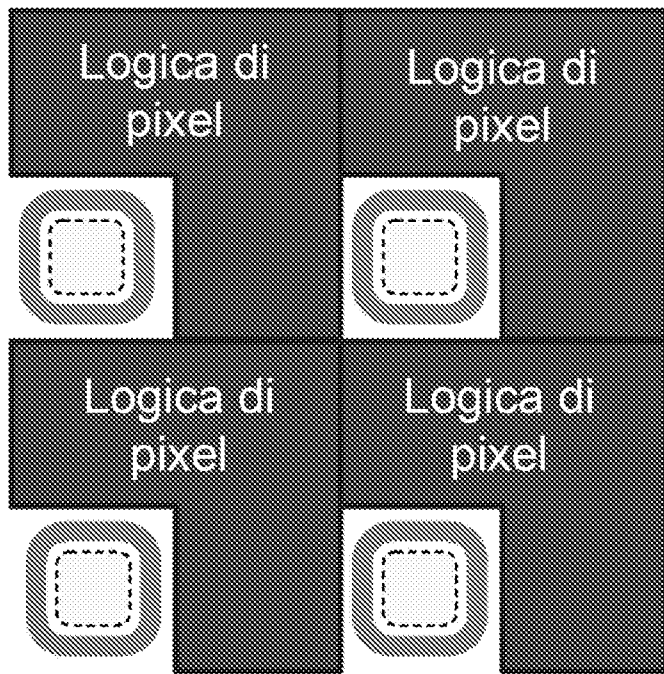


FIG. 8a



FIG. 8b

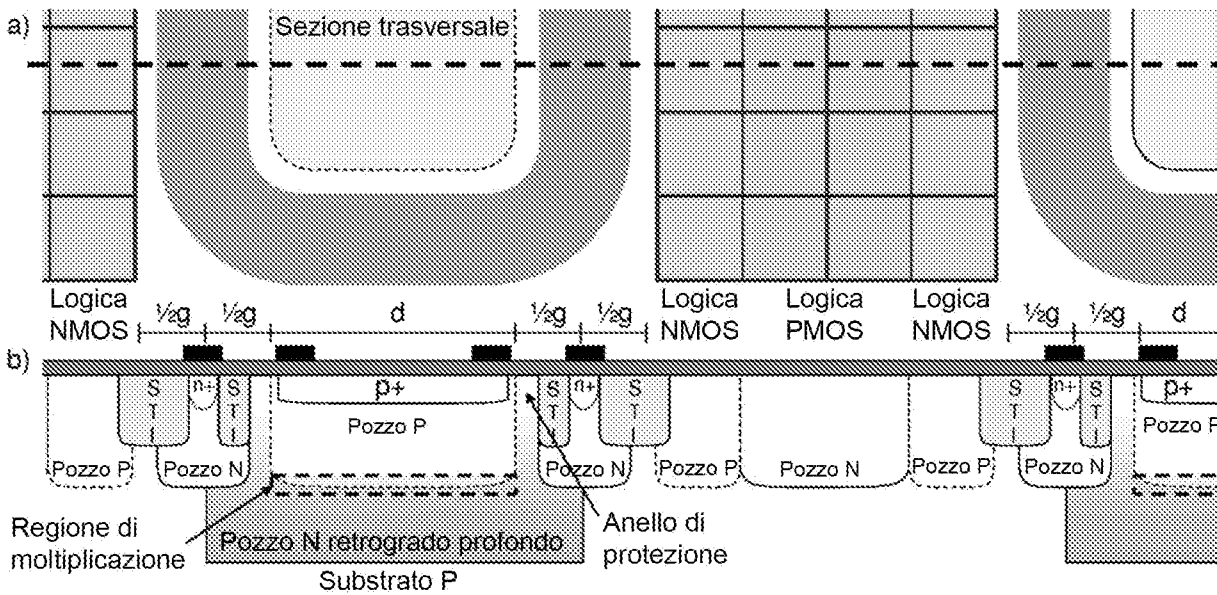


FIG. 9

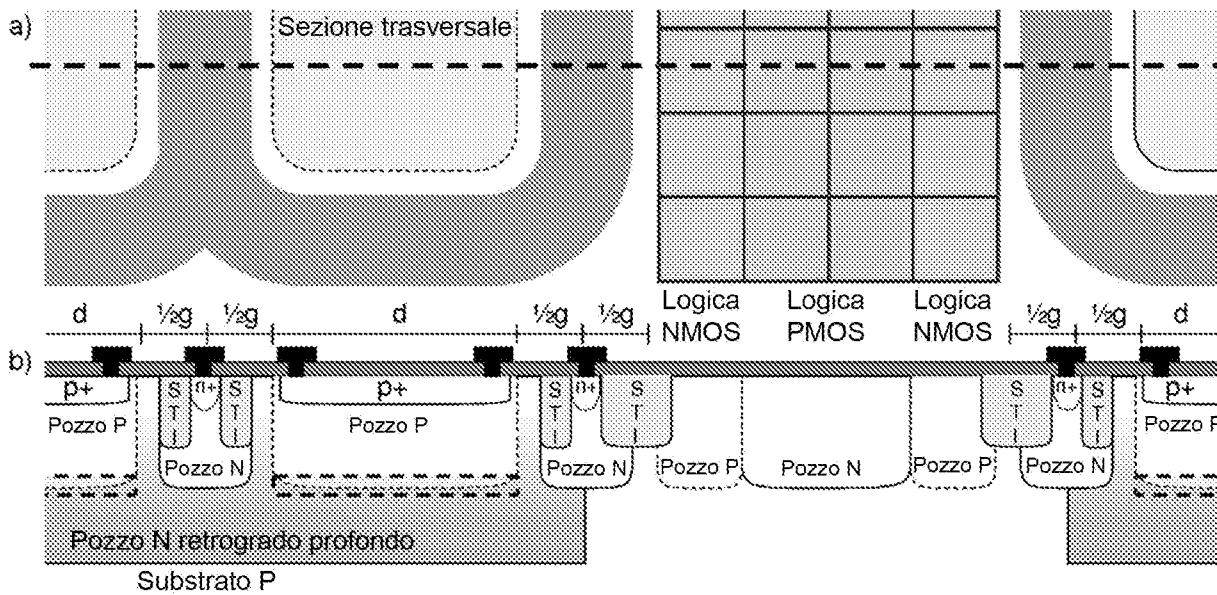
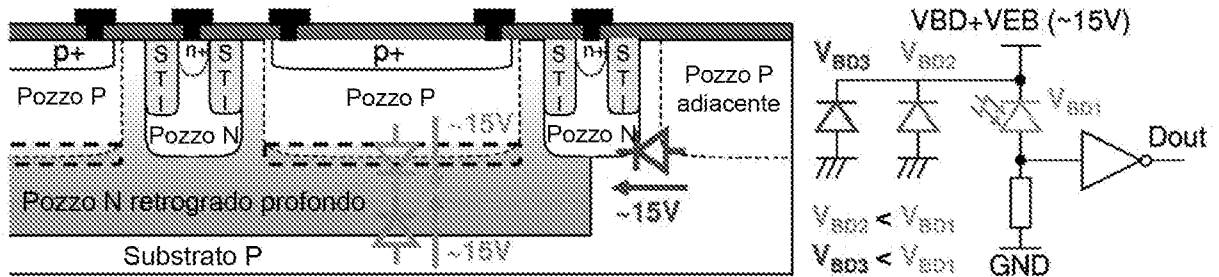
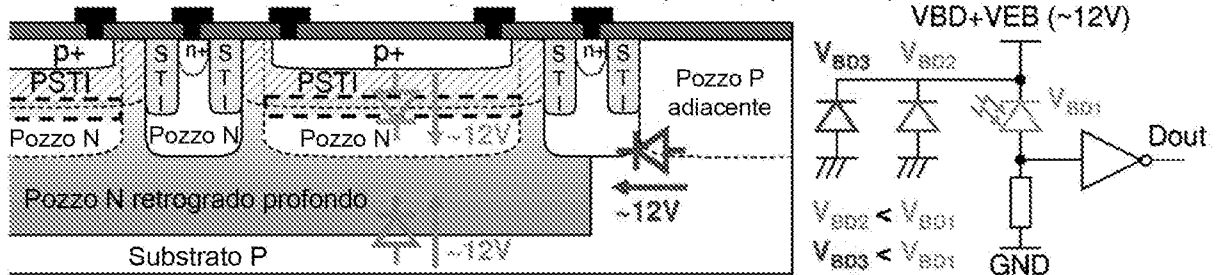


FIG. 10

- a) Anello di protezione EPI per prevenire la scarica laterale verso il pozzo P adiacente



- b) Giunzione SPAD a tensione di scarica ridotta (PSTI - pozzo N)



- c) Uscita ad accoppiamento capacitivo che permette di evitare tensioni parassite

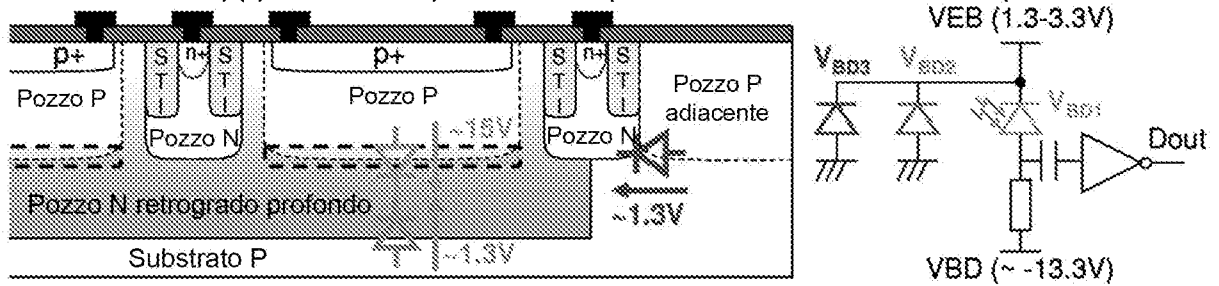


FIG. 11

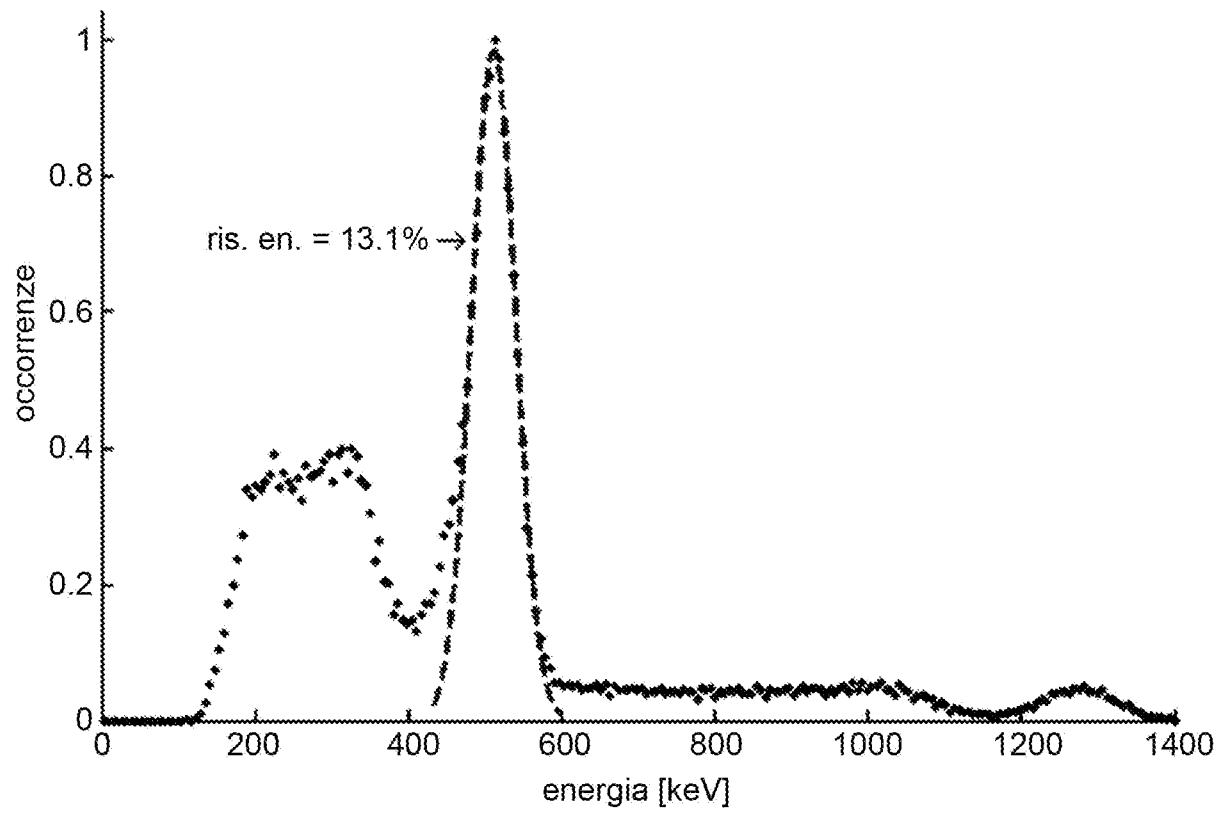


FIG. 12

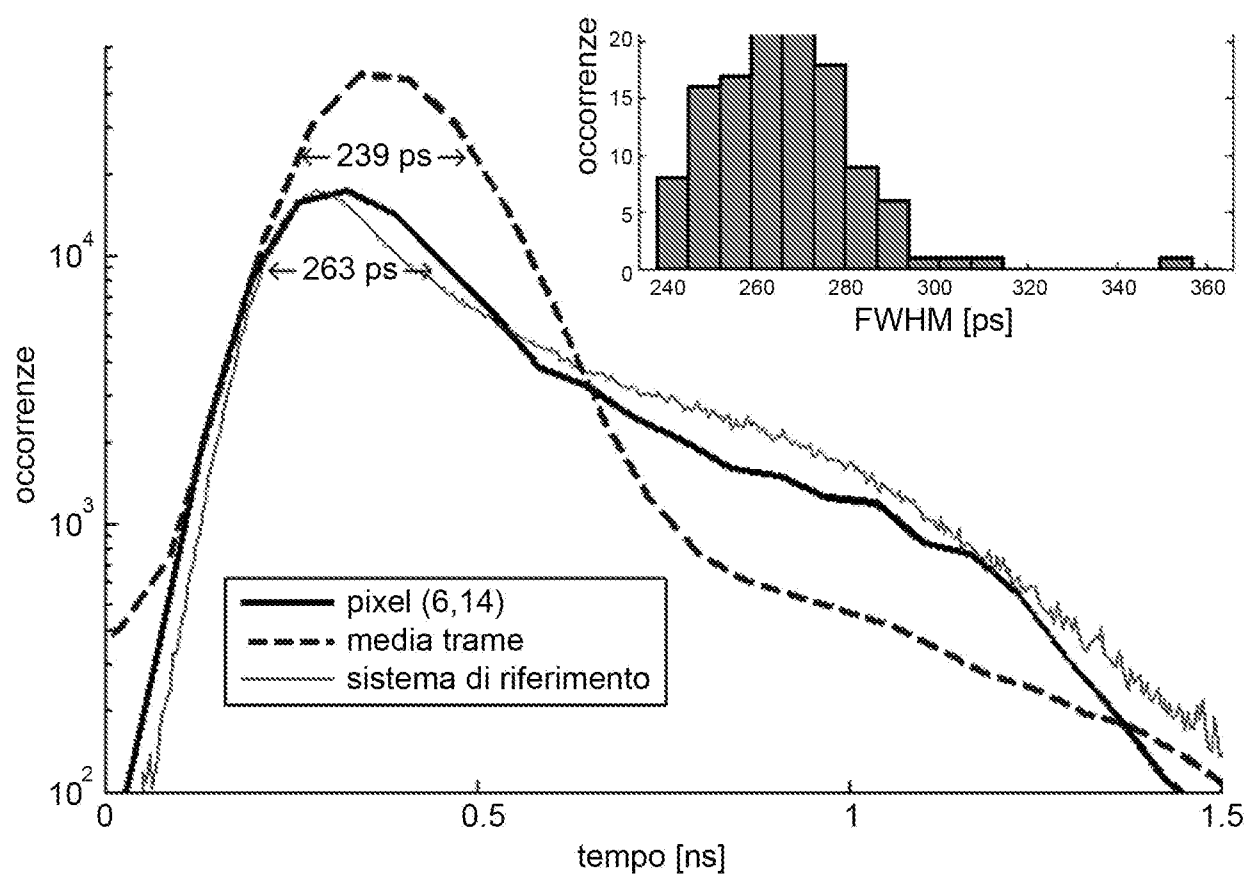


FIG. 13