

Fotorivelatori microelettronici ultrasensibili

SERGIO COVA • FRANCO ZAPPA • MASSIMO GHIONI
Politecnico di Milano Dipartimento di Elettronica e Informazione Milano

Le applicazioni delle tecniche di misura a conteggio di singoli fotoni vengono brevemente inquadrare, delineandone recenti sviluppi. I rivelatori microelettronici SPAD Single-Photon Avalanche Diodes in silicio danno impulsi elettrici macroscopici in risposta a singoli fotoni, utilizzando la moltiplicazione a valanga per ottenere un funzionamento a scatto, simile a quello dei contatori di Geiger. Viene descritto il loro sviluppo, legato anche all'evoluzione dei circuiti di spegnimento attivo della valanga, e ne vengono discusse caratteristiche e prestazioni confrontandoli con i fotomoltiplicatori a vuoto, largamente impiegati nelle tecniche a singoli fotoni. Viene illustrata la situazione attuale della tecnologia degli SPAD e delineati alcuni obiettivi per ulteriori sviluppi.

1. Perché rivelare singoli fotoni?

Nella misura di segnali luminosi deboli, il limite ultimo di sensibilità è rivelare l'arrivo di singoli quanti di radiazione ottica nel visibile e nel vicino infrarosso, cioè singoli fotoni. Data l'esiguità dell'energia associata a un fotone, è evidente la difficoltà di questo obiettivo. Viene però spontaneo domandarsi se rivelare singoli fotoni abbia anche un interesse applicativo o costituisca solo un record, utile al più per effettuare qualche raffinato esperimento di fisica. Prima di spiegare come sia possibile realizzare in silicio rivelatori con caratteristiche adatte allo scopo, è quindi opportuno delineare utilizzazione attuale e prospettive future di queste tecniche.

Anzitutto, è possibile citare sinteticamente vari campi in cui le tecniche basate sul conteggio di fotoni (*photon counting*, PC) e sul rilevamento dei tempi di arrivo di fotoni (*time correlated photon counting*, TCPC) trovano applicazione: misure di emissioni e decadimenti fluorescenti in scienza dei materiali, chimica, biologia, medicina; misure di luminescenza in semiconduttori; microscopia ottica avanzata; microspettrofluorometria per analisi di piccole quantità di materiali; caratterizzazione di diodi laser impulsati e di fibre ottiche; tecniche a correlazione di fotoni in velocimetria laser di fluidi e scattering dinamico di luce; crittografia quantica; *laser ranging* di satelliti e altri oggetti remoti; astronomia, particolarmente con telescopi ad ottica adattiva. Si può poi farsi un'idea meglio definita della loro utilità considerando più da vicino alcuni esempi. I più avanzati microscopi ottici esistenti, che permettono di raggiungere una risoluzione migliore della lunghezza d'onda della luce illuminante il preparato, cioè i microscopi con focali a scansione laser, funzionano grazie ai rivelatori per conteggio di fotoni, unico mezzo adatto alla misura della debolissima intensità luminosa raccolta punto per punto della scansione. Appareti microspettrofluorometrici in grado di analizzare singole cellule di sostanze di interesse biologico sono stati sviluppati da più di due decenni. Oggi si lavora per estendere le capacità di analisi a quantità sempre più piccole di materia, fi-

no a singole molecole; un esempio di particolare attualità è costituito dal lavoro in corso nell'ambito del progetto Genoma per sviluppare apparati in grado di individuare le sequenze di coppie di basi nel DNA, in particolare in grado di svolgere tale compito in tempi abbastanza rapidi da renderli utili come apparati diagnostici [1].

Le diverse coppie di basi della molecola del DNA possono essere riconosciute grazie alle diverse fluorescenze proprie o indotte da appositi coloranti, che si legano selettivamente alle varie coppie di basi, e si vuole individuare e misurare la fluorescenza caratteristica di ciascuna base in un tempo brevissimo, millisecondi o meno. In laboratori americani, vengono attualmente sviluppati e sperimentati apparati con lo schema illustrato in figura 1. Dalla molecola di DNA, fissata ad un estremo e distesa, la coppia di basi che si trova al termine viene sezionata da un enzima e trascinata dal flusso laminare di un liquido entro un capillare. Il flusso viene intercettato da un fascio di luce laser in una ristretta zona che la coppia di ba-

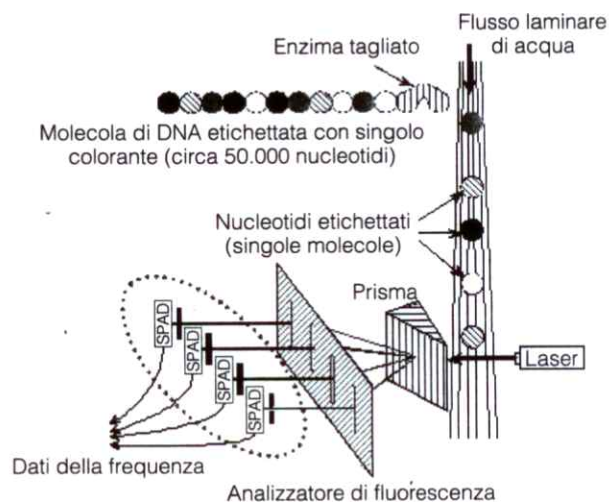


Figura 1 Schema di apparato per determinazione rapida della sequenza di coppie di basi nel DNA tramite misure di fluorescenza a conteggio di fotoni.

si, trascinata dal flusso, attraversa in un tempo brevissimo. Durante questo tempo la fluorescenza viene eccitata e rivelata attraverso un sistema ottico, che separa le bande di lunghezza d'onda corrispondenti alle diverse basi, indirizzandole a diversi rivelatori di singoli fotoni. Questi rivelatori devono avere elevata efficienza di rivelazione, soprattutto nella regione spettrale del rosso e del vicino infrarosso, e basso rumore proprio, in modo da poter affidabilmente riconoscere la coppia nel brevissimo tempo a disposizione. Nelle misure della posizione di satelliti e altri oggetti remoti con precisione centimetrica, richieste per rilevamenti geodetici (ad esempio, rilevamenti del moto relativo di continenti), l'affermazione di tecniche a singoli fotoni è dovuta alla combinazione di elevata sensibilità e capacità di determinare l'istante di arrivo di un singolo fotone con errore inferiore a 100 picosecondi. Oggi sono allo studio apparati in cui la misura del tempo di volo di fotoni viene utilizzata per rilevare con precisione il profilo di oggetti vicini senza toccarli, come illustrato in figura 2. Si utilizzano laser impulsati rapidi a bassa potenza, tipicamente diodi laser, e si rileva l'intervallo di tempo intercorrente tra l'arrivo di fotoni riflessi dalla superficie dell'oggetto e di fotoni riflessi da quella di un piano di riferimento. Utilizzando laser ad alto tasso di ripetizione degli impulsi ed effettuando medie su misure ripetute, si ottengono in tempi brevi rilevamenti con precisione dell'ordine di dieci micron.

Quali sono i fotorivelatori con cui si può giungere a rivelare singoli fotoni? Certo non i normali fotodiodi a vuoto o a semiconduttore, perché in essi un fotone genera un impulso di corrente microscopico, di carica pari a quella di un elettrone. Esso è estremamente piccolo rispetto al rumore dei circuiti elettronici collegati al rivelatore e ne viene sommerso, risultando del tutto indistinguibile. Occorrono fotorivelatori in cui, tramite un qualche fenomeno fisico interno al rivelatore stesso, si produca all'uscita un segnale elettrico di livello elevato, ben distinguibile dal rumore dei successivi circuiti elettronici.

2. Fotorivelatori a stato solido

Per i fotorivelatori a vuoto, il fenomeno fisico adatto è stato individuato fin dagli anni '40 nell'emissione secondaria di elettroni.

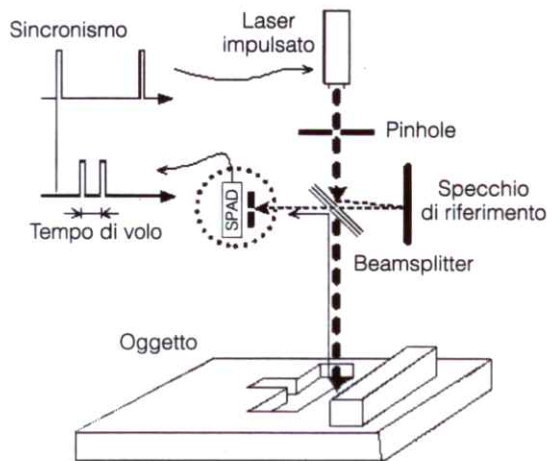


Figura 2 Schema di apparato per monitoraggio e misura di profili di oggetti mediante misure di tempo di volo di singoli fotoni riflessi.

daria di elettroni. Sono così stati ideati i fototubi moltiplicatori o fotomoltiplicatori (*photomultiplier tube*, PMT), nei quali tra catodo e anodo è interposta una sequenza di elettrodi, detti dinodi. Un elettrone emesso dal fotocatodo viene accelerato da una tensione di qualche centinaio di Volt e fatto incidere sul primo dinodo, provocando l'emissione secondaria di vari elettroni (normalmente da tre a cinque), che a loro volta vengono accelerati verso il secondo dinodo, dove provocano una nuova emissione di elettroni, e così via. Il numero di elettroni cresce esponenzialmente con il numero di dinodi utilizzati e l'amplificazione raggiunge valori anche maggiori di un milione. In verità il fattore di amplificazione è affetto da fluttuazioni statistiche che, però, data la natura del meccanismo di amplificazione sono piuttosto moderate. I fotomoltiplicatori risultano assai utili sia come fotorivelatori analogici, dotati di elevata amplificazione interna, sia come rivelatori digitali di singoli fotoni, collegando all'uscita un circuito che, a partire dagli impulsi forniti dal rivelatore in risposta a singoli fotoni, generi impulsi adatti a essere trattati da circuiti di conteggio o di misura di tempo di arrivo.

Dall'inizio degli anni '60 i fotomoltiplicatori sono stati il cavallo di battaglia per lo sviluppo delle tecniche a singoli fotoni, senza concorrenza da parte di rivelatori a semiconduttore fino agli anni '80. Ciò appare sorprendente, visto che in questo genere di applicazioni sono decisamente attraenti i vantaggi tipici dell'elettronica a stato solido (riduzione delle dimensioni fisiche, delle tensioni di alimentazione e della dissipazione di potenza dei dispositivi; maggiore compattezza, robustezza e affidabilità; insensibilità ai campi magnetici; ecc.). Ancor più attraente è l'efficienza quantica di rivelazione offerta dai semiconduttori, assai migliore di quella ottenibile con i fotocatodi dei tubi a vuoto, particolarmente nelle regioni spettrali del rosso e del vicino infrarosso. Infatti i normali fotodiodi a vuoto sono stati soppiantati da quelli a semiconduttore in tutte le applicazioni, salvo casi in cui occorre un'area attiva di diametro superiore a qualche millimetro. Il motivo per cui non è stato invece sviluppato un vero fotomoltiplicatore a stato solido risiede nella natura del meccanismo di amplificazione disponibile nei semiconduttori, la moltiplicazione a valanga dei portatori, utilizzata appunto nei fotodiodi a valanga (*Avalanche Photodiodes*, APD). Essa è simile alla cascata di emissioni secondarie nei PMT, ma con una differenza fondamentale: presenta intrinsecamente una spirale di reazione positiva. Infatti un elettrone accelerato dal campo elettrico che ionizza urtando nel reticolo cristallino, genera non solo un elettrone libero secondario, ma anche una lacuna elettronica. La lacuna viene accelerata in senso contrario a quello degli elettroni e può quindi ionizzare in una posizione situata a monte rispetto al percorso dell'elettrone originale, generandovi un'altra coppia secondaria elettrone-lacuna. La reazione positiva aumenta l'amplificazione ottenibile nella giunzione, ma aumenta notevolmente anche le fluttuazioni statistiche nel processo di moltiplicazione, che risultano notevolmente maggiori di quelle riscontrate nei PMT. Purtroppo al crescere del campo elettrico le fluttuazioni crescono più rapidamente dell'amplificazione, così che i fattori di amplificazione ottenibili in condizioni operative con i fotodiodi a valanga sono di vari or-

dini di grandezza inferiori a quelli dei PMT.

Il silicio è comunque avvantaggiato rispetto al germanio ed ai semiconduttori composti III-V. Infatti nel silicio elettroni e lacune hanno efficienza di ionizzazione per urto molto diversa: quella delle lacune è assai minore, particolarmente se il campo elettrico ha intensità appena superiore alla soglia di ionizzazione. Si può quindi avere una reazione positiva più debole: infatti con fotodiodi a valanga a struttura specificamente progettata e costruiti con silicio ad altissima resistività, estremamente puro, si raggiungono fattori di amplificazione piuttosto elevati, con valori medi anche dell'ordine di mille. Utilizzando questi fotodiodi uniti a preamplificatori a basso rumore, è possibile ottenere da singoli fotoni degli impulsi di ampiezza sufficientemente maggiore del rumore elettronico da poterli riconoscere mediante un comparatore avente soglia posta appena sopra la fascia del rumore. Tuttavia la moltiplicazione ha dispersione statistica notevolmente maggiore di quella riscontrata nei PMT: di conseguenza, buona parte degli impulsi da singoli fotoni rimane al di sotto della soglia di discriminazione e l'efficienza di rivelazione ne risulta significativamente diminuita. Inoltre, risulta difficile controllare e mantenere stabile il valor medio G dell'amplificazione. Infatti G cresce rapidamente al diminuire della differenza ($V_B - V_a$) tra la tensione di breakdown del fotodiodo V_B e la tensione di polarizzazione ad esso applicata V_a . Dato poi che il valore di V_B varia notevolmente con la temperatura del fotodiodo, escursioni dell'ordine di un grado centigrado risultano sufficienti a causare rilevanti variazioni di G . Ulteriori limitazioni si riscontrano in altri aspetti del funzionamento, ad esempio nella precisione con cui è possibile rilevare il tempo di arrivo del fotone. In definitiva, l'idea di sfruttare il fenomeno di valanga per ottenere fotomoltiplicatori a stato solido dotati di elevato guadagno interno risulta solo parzialmente attuabile, e cioè solo con fotodiodi in silicio e solo con significative limitazioni delle prestazioni.

La reazione positiva insita nel fenomeno di valanga, che vieta di ottenere dai fotodiodi una amplificazione lineare elevata come quella dei PMT, rende però possibile un diverso modo di funzionamento, simile a quello dei rivelatori di Geiger per radiazioni ionizzanti e particolarmente adatto alla rivelazione di singoli fotoni [2-4]. Quando una giunzione p-n viene polarizzata a tensione inversa V_a superiore a quella di breakdown V_B , il campo elettrico è così elevato che un singolo portatore di carica generato nella zona di svuotamento riesce a innescare un processo di moltiplicazione a valanga, che si autosostiene grazie alla forte reazione positiva. Poniamo di avere un diodo avente debole o moderato tasso di generazione di portatori per effetto termico (ad esempio 10^5 eventi al secondo o meno) e di portare bruscamente la tensione di polarizzazione sopra V_B , mantenendo il diodo al buio. Si osserva che trascorre un intervallo di tempo finito (mediamente una decina di microsecondi o più) prima che il diodo autoinneschi la valanga generando termicamente un portatore. Pertanto, se ripetiamo l'esperimento illuminando il diodo, un fotone che arrivi durante questo intervallo e liberi una coppia elettrone-lacuna può innescare la valanga, generando un impulso di corrente macroscopico con intensità di milliAmpere e fronte di salita che marca l'arrivo

del fotone stesso. Una giunzione p-n di questa qualità, osservata con un oscillografo caratteristigrafo, presenta nella curva corrente-tensione inversa una caratteristica biforcuzione in corrispondenza a V_B (vedere Figura 3). Si vedono inoltre altre linee erratiche, non ripetitive, che congiungono i due rami.

Il ramo a corrente nulla corrisponde alle spazzate di tensione nelle quali la valanga non viene innescata affatto; quello a corrente linearmente crescente a casi in cui la valanga viene innescata appena oltrepassata V_B ; le linee erratiche a casi in cui l'innesco avviene con significativo ritardo. Facendo lavorare il diodo con un circuito di polarizzazione che provveda a spegnere il processo di valanga poco dopo l'innesco (abbassando per breve tempo la tensione e poi ripristinandola) è possibile rivelare un successivo fotone e così via. In definitiva, polarizzando il fotodiodo a tensione superiore a quella di breakdown e controllandolo con un opportuno circuito di spegnimento (*Quenching Circuit*), si ottiene un rivelatore che produce in risposta a singoli fotoni impulsi elettrici macroscopici. È da sottolineare che l'ampiezza degli impulsi è standard, indipendente dall'entità della carica primaria generata: quando arrivano contemporaneamente due o più fotoni, l'impulso di uscita è identico al caso di un fotone solo. Si tratta quindi di un rivelatore di eventi, non di un rivelatore analogico proporzionale: a differenza del PMT, non è paragonabile ad un amplificatore ma ad un circuito digitale monostabile. Esso risulta quindi notevolmente diverso dai normali fotodiodi a valanga (APD), che lavorano polarizzati a tensione inferiore al breakdown, e viene normalmente chiamato *Single Photon Avalanche Diode*, SPAD. Come nel caso dei PMT, nelle misure a conteggio di fotoni con SPAD il rumore del fotorivelatore è dato dalle fluttuazioni del numero di impulsi spontanei, cioè dovuti alla generazione termica nel diodo e osservabili anche col fotorivelatore non illuminato (conteggi di buio, *dark-counting rate*). Esso è l'analogo del rumore dovuto alla corrente di buio (*dark-current*) nei normali fotodiodi. In questi ultimi, però, risulta significativo, anzi è addirittura preponderante il contributo di rumore dei circuiti elettronici che, invece, nel caso degli SPAD e dei PMT non ha alcun effetto.

3. Circuiti di spegnimento della valanga

Il modo più semplice per realizzare un circuito di spegnimento è quello di inserire una resistenza di valore elevato

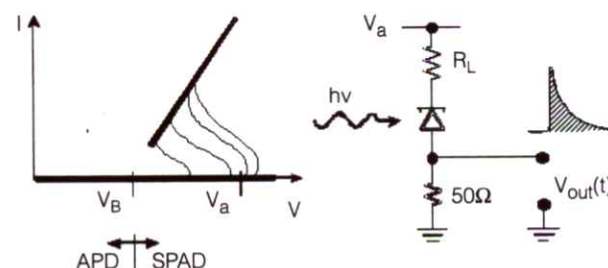


Figura 3 A sinistra, caratteristica corrente-tensione inversa di diodi SPAD, operanti al di sopra della tensione di breakdown V_B in valanga a regime di Geiger. A destra, schema di circuito di polarizzazione per spegnimento passivo con R_L elevata, tipicamente 500 k Ω .

(centinaia di kiloOhm) in serie alla sorgente di tensione di polarizzazione, in modo che la corrente di valanga si autospegna, facendo cadere la tensione V_D sullo SPAD al di sotto della tensione di alimentazione V_a , fino al livello di V_B . La piccola resistenza in serie verso massa serve invece per osservare l'impulso di corrente di valanga, che ha fronte di salita anche più rapido di un nanosecondo. Questa semplice configurazione, schematizzata in figura 3, viene chiamata circuito di spegnimento passivo (*Passive Quenching Circuit PQC*). È una soluzione semplice, ma poco efficiente, tanto da limitare notevolmente le prestazioni ottenibili da uno SPAD [4]. Lo spegnimento è rapido, perchè la corrente di valanga scarica rapidamente la capacità C_D associata allo SPAD. Spento lo SPAD, la C_D si ricarica invece lentamente tramite la elevata resistenza di carico. La tensione sullo SPAD risale esponenzialmente verso V_a , con costante di tempo $R_L C_D$ tipicamente intorno al microsecondo. Durante questo lento transitorio lo SPAD può essere innescato mentre si trova a una qualche tensione compresa tra V_B e V_a e ciò causa notevoli complicazioni e limitazioni. L'efficienza di rivelazione di fotoni cresce con $V_D - V_B$, così come l'ampiezza dell'impulso di corrente generato (vedere Figura 3): perciò, a seconda di quando è generato durante il recupero, un impulso può superare o meno la soglia del circuito a valle. In *photon counting*, essendo i fotoni statisticamente distribuiti nel tempo, durante i recuperi dopo gli eventi rivelati si ha una perdita di conteggi che è difficile valutare e correggere. Le correzioni normalmente impiegate per apparati di conteggio a tempo morto ben definito non risultano accurate, perchè la situazione è molto più complessa. Inoltre, anche il tasso di generazione di impulsi di buio cresce con $V_D - V_B$. In definitiva, le misure risultano accurate solo nei casi in cui le perdite sono trascurabili, cioè quando il tasso di conteggio totale (fotoni rivelati più impulsi di buio) è basso o moderato: nei casi più favorevoli si può arrivare a 100 kcps. Rispetto all'arrivo del fotone, il fronte di corrente di valanga generato presenta un ritardo con valor medio e fluttuazioni nettamente decrescenti al crescere di $V_D - V_B$. Nel rilevamento del tempo di arrivo di fotoni, si hanno perciò errori maggiori per gli eventi rilevati durante il recupero da eventi precedenti. Nei casi in cui la precisione temporale è importante (*TCPC*, *laser ranging*, ecc.) si pongono quindi limitazioni ancor più stringenti al tasso di conteggio massimo ammissibile. In conclusione, operando con PQC gli SPAD forniscono prestazioni ridotte e la loro applicazione pratica è notevolmente limitata.

Con l'introduzione [5,6] del circuito di spegnimento attivo (*Active Quenching Circuit, AQC*) si è finalmente aperta la strada all'applicazione degli SPAD su scala più ampia. Il principio di funzionamento degli AQC, illustrato in figura 4, consiste nel polarizzare lo SPAD con una sorgente di tensione comandata a bassa resistenza, associata ad un circuito (C in Figura 4) che senta la corrente di valanga e comandi di conseguenza la polarizzazione. Il circuito C comanda un circuito driver di tensione (DR in Figura 4) che, dopo ciascun innesco, porta rapidamente la tensione sullo SPAD sotto V_B per spegnere la valanga, la tiene bassa per un tempo breve e ben controllato (*hold-off time*) ed infine la ripristina rapidamente al valore iniziale. La transizione di ripristino avviene in pochi nanosecondi, rendendo tra-

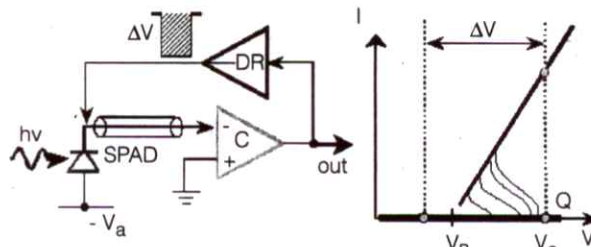


Figura 4 Principio di funzionamento dei circuiti di spegnimento attivo (Active Quenching Circuit, AQC) per fotoregistratori SPAD.

scurabile la probabilità che vi si verifichino inneschi a tensione V_D inferiore al valore corretto V_a . Lo SPAD funziona così con tempo morto breve e ben definito.

Il principio dell'AQC è concettualmente analogo a soluzioni sperimentate molto tempo fa (negli anni '50) con i contatori di Geiger per radiazioni ionizzanti, ma nel caso degli SPAD si pongono problemi nuovi, data la velocità delle transizioni, l'entità delle capacità del rivelatore e le conseguenti correnti capacitive in gioco. I problemi divengono naturalmente tanto maggiori quanto maggiore è $V_a - V_B$ (detto usualmente eccesso di tensione applicata, *excess bias voltage*), e quanto maggiore è la velocità richiesta. L'AQC è stato introdotto nel 1975 al Politecnico di Milano [5] e ne sono state poi sviluppate varie generazioni in questo ed in altri laboratori [4,3,6], rispondendo ai più diversi requisiti applicativi. Sono oggi disponibili circuiti compatti in grado di far lavorare SPAD con *excess bias voltage* superiore a 20 V, con tempi morti inferiori a 50 ns ed anche di far funzionare il rivelatore sotto controllo diretto di un segnale di *gate* veloce, con intervalli di *gate* brevi fino a 10 ns. Sono stati realizzati e sperimentati microcircuiti in cui è integrato quasi tutto l'AQC, escluso il solo driver di tensione. Lo sviluppo di AQC completi in forma di integrato monolitico è attualmente in corso. Viene spontaneo chiedersi quali siano le prospettive di realizzare integrati monolitici includenti sia il fotoregistratore SPAD che il circuito di spegnimento attivo. Esse sono condizionate dalla compatibilità tecnologica dello SPAD e del circuito integrato, perciò possono essere valutate solo tenendo ben presente strutture e tecnologie dei dispositivi SPAD in silicio, che qui illustriamo brevemente.

4. Strutture degli SPAD

Non tutti i fotodiodi sono in grado di funzionare da SPAD. Il dispositivo va progettato opportunamente e fabbricato con adeguate tecnologie [2]. La giunzione deve avere campo elettrico uniforme su tutta l'area sensibile, evitando accuratamente zone di campo più elevato, anche di piccole dimensioni. La struttura va quindi progettata in modo da evitare concentrazioni di campo, particolarmente ai bordi. La tecnologia di fabbricazione deve garantire qualità molto buona del silicio nella giunzione, evitando la formazione di piccole zone difettate per presenza di precipitati o altro. Occorre inoltre minimizzare la concentrazione di centri di generazione e livelli intrappolanti, in modo da ridurre il tasso di generazione termica di portatori. Gli SPAD attualmente disponibili e illustrati nella letteratura tecnica e scientifica possono essere ri-

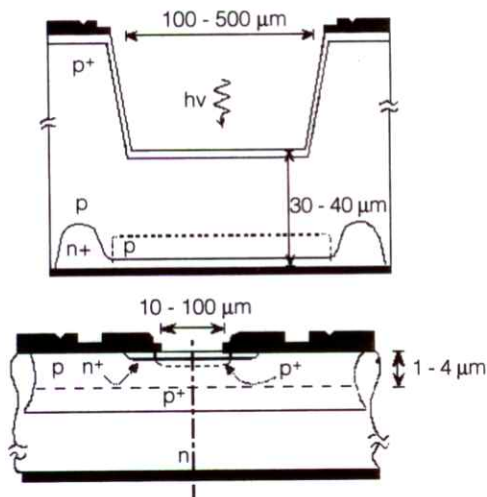


Figura 5 Strutture tipiche di SPAD in silicio: in alto dispositivi a zona svuotata spessa, progettati per alta efficienza di rivelazione di fotoni; in basso dispositivi in tecnologia planare con zona svuotata sottile, progettati per risposta ultraveloce, nel campo dei picosecondi.

condotti sostanzialmente a due tipi base, sviluppati con diversi obiettivi.

Il primo tipo [3] è stato sviluppato soprattutto da R.J. McIntyre, P.Webb e collaboratori nei laboratori di ricerca industriale della RCA Electrooptics, oggi divenuti EG&G Optoelectronics, e mira ad ottenere elevata efficienza di rivelazione su un campo spettrale il più ampio possibile, particolarmente nel vicino infrarosso. Come schematizzato in figura 5 in alto, la giunzione ha uno strato di svuotamento piuttosto spesso, da 30 a 40 micron, ed area sensibile abbastanza ampia, con diametro fino a 500 micron. La struttura scavata del dispositivo permette di agire direttamente sulla zona di giunzione con raffinate tecniche di *gettering*, grazie alle quali è possibile ottenere un'ottima qualità del silicio. Conseguentemente il tasso di impulsi di buio, nonostante il volume della giunzione sia notevole, può essere ridotto a livelli molto bassi, anche poche centinaia di impulsi al secondo a temperatura ambiente. Occorre però utilizzare fette di silicio estremamente puro ad alta resistività (alcuni kΩ cm) e la tecnologia di fabbricazione risulta incompatibile con la realizzazione di circuiti integrati. L'efficienza di rivelazione è molto elevata, come illustrato in figura 6:

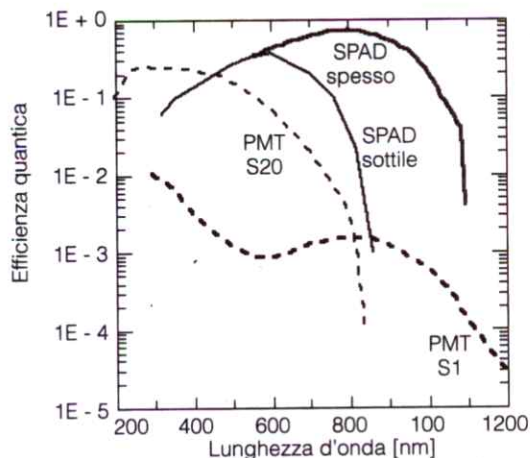


Figura 6 Efficienza di rivelazione di fotoni di fotorelevatori SPAD al silicio e di fotomoltiplicatori normalmente impiegati nella regione spettrale visibile (con fotocatodo S20) e nel vicino infrarosso (con fotocatodo S1).

essa si mantiene sopra al 50% da 600 a 900 nm, poi declina, ma è pur sempre circa il 3% a 1064 nm. Per confronto, sono riportate curve di efficienza tipiche di PMT di buona qualità. La precisione raggiungibile nella determinazione del tempo di arrivo di un fotone è abbastanza buona, tra 150 e 350ps a seconda del dispositivo.

Il secondo tipo di SPAD è stato sviluppato principalmente al Politecnico di Milano dal nostro gruppo [2,7] con il fondamentale supporto della SGS-Thomson, che ha messo a disposizione competenze e mezzi per la fabbricazione dei dispositivi nei laboratori di Cornaredo (Milano). Si è mirato soprattutto ad ottenere elevata precisione nella misura del tempo di arrivo di fotoni, cercando di progettare dispositivi compatibili con le tecnologie planari normalmente impiegate nella fabbricazione dei circuiti integrati. Come schematizzato in figura 5 in basso, si tratta di dispositivi planari costruiti in uno strato epitassiale p su substrato n. La giunzione ha strato di svuotamento sottile, da 1 a 4 micron, ed area sensibile relativamente piccola, con diametro da 10 a 100 micron. Con questi SPAD la precisione nella determinazione del tempo di arrivo di un fotone risulta assai elevata, migliore di 20ps, ed il tasso di impulsi di buio piuttosto basso, specialmente nei dispositivi di area minore. L'efficienza di rivelazione è meno elevata, ma pur sempre notevole rispetto a quella offerta dai PMT, come visibile in figura 6: dal 45% a 600nm essa scende al 10% a 830 nm e si riduce a qualche 0.1% a 1064 nm. Avendo compreso e studiato come in questi SPAD a giunzione sottile l'allargamento della valanga dal punto iniziale a tutta l'area sensibile avviene con un fenomeno di propagazione ordinata, è stato anche possibile ideare e sperimentare un sensore SPAD lineare, con cui si può determinare la coordinata di arrivo del fotone con errore di 5 micron su un tratto di 70 micron [8].

5. Matrici di fotorelevatori di singoli fotoni

Di notevole attuale interesse è lo sviluppo di schiere di SPAD integrate monolitiche, sia lineari che a matrice (*SPAD arrays*), che aprirebbe nuove possibilità in molte applicazioni. A titolo esemplificativo, si consideri la possibilità di effettuare simultaneamente misure dello spettro e della distribuzione spaziale di fotoni incidenti lungo una coordinata, come schematizzato in figura 7. Mentre lo sviluppo degli *APD detector arrays* è stato sinora frenato dalla difficoltà di ottenere amplificazione uniforme in tutti gli elementi, per gli *SPAD detector arrays* non si pone questo problema. Occorre però superare anzitutto un'altra basilare difficoltà, posta da un fenomeno per cui i diversi elementi dell'array interferiscono tra loro: l'emissione di fotoni da parte dei portatori caldi della corrente di valanga.

Come delineato in figura 8, i fotoni emessi da un elemento si propagano nel silicio come in una guida d'onda e possono essere assorbiti in un altro elemento dell'array, generandovi un impulso spurio. Benchè l'emissione abbia bassa efficienza (un fotone emesso ogni 10⁵ elettroni traversanti la giunzione), la probabilità di questa diafonia (*optical crosstalk*) tra elementi vicini risulta significativa a causa della estrema sensibilità degli SPAD. Occorre

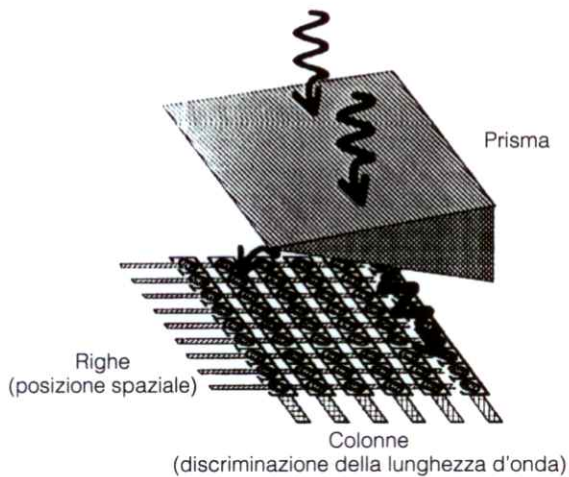


Figura 7 Schema di rilevamento di spettro e distribuzione spaziale di fotoni lungo una coordinata mediante un rivelatore a matrice bidimensionale di SPAD.

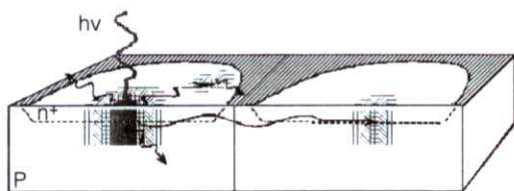


Figura 8 Diafonia tra elementi di un rivelatore ad array monolitico di SPAD, causata da fotoni emessi dalla corrente di valanga in un elemento e assorbiti nell'elemento adiacente.

trovare il modo di introdurre tra gli elementi dell'array uno schermo ottico, utilizzando però un procedimento tecnologico compatibile con la fabbricazione degli SPAD. Questo è tuttora un problema aperto. La sua soluzione infatti è uno dei principali obiettivi di un progetto di ricerca in corso per lo sviluppo di SPAD adatti ad ap-

parati di microscopia avanzata, svolto con il supporto della Comunità Europea da un consorzio di due industrie (Carl Zeiss, Oberkochen, Germania; IBH, Glasgow, Scozia) e due università (Politecnico di Milano, Italia; NMRC, University College Cork, Irlanda).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fitzgerald M: Photonics Speeds Up DNA Research. *Photonics Spectra*, aprile 1996, vol. 30, n. 4, 70-75.
- [2] Cova S, Ripamonti G, Lacaita A: Avalanche Semiconductor Detector for Single Optical Photon With a Time Resolution of 60 ps. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1987, vol. A253, n. 482-487.
- [3] Dauter H, Deschamps P, Dion B, Mac Gregor A D, Mac Sween D, Mc Intyre R J, Trottier C, Webb P: Photon Counting techniques with silicon avalanche photodiodes. *Appl. Opt.*, 1993, vol. 32, n. 3894-3900.
- [4] Cova S, Ghioni M, Lacaita A, Samori C, Zappa F: Avalanche photodiodes and quenching circuits for single photon -detection. *Appl. Optics.*, 1996, vol. 35, n. 1956-1976.
- [5] Antognetti P, Cova S, Longoni A: A study of the operation and performances of an avalanche diode as a single photon detector. *Proc. 2nd Ispra Nuclear Electronics Symposium*, Stresa May 20-23, 1975, *Euratom Publication EUR 537e*, 1975, p. 453-456.
- [6] Cova S, Longoni A, Andreoni A: Towards Picosecond Resolution with Single-Photon Avalanche Diodes. *Rev. Sci. Instrum.* 52, 1981, p. 408-412 ()
- [7] Lacaita A, Cova S, Ghioni M, Zappa F: Single Photon Avalanche Diodes with ultrafast pulse response free from slow tails. *IEEE Electron Device Lett.*, 1993, vol. 14, n. 7, 360-362.
- [8] Ripamonti G, Ghioni M, Cova S, Mastrapasqua M: Propagating avalanche position-sensitive photon detector with resolution in the micron and picosecond range. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, 1992, vol. 13, p. 35-37.