

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. Apparat 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-

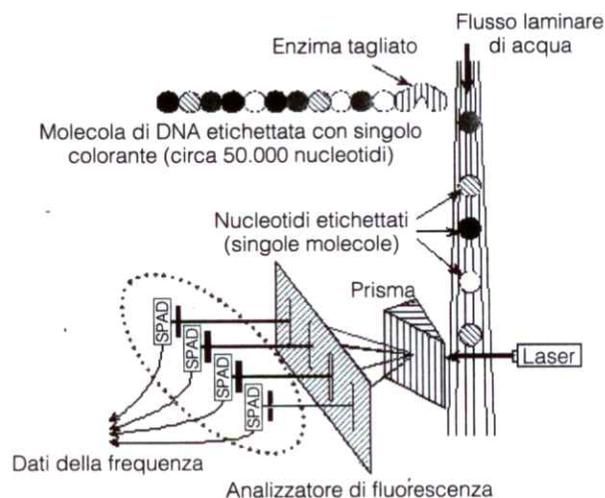


Figura 1 Schema di apparato per determinazione rapida della sequenza di coppie di basi nel DNA tramite misure di fluorescenza a conteggio di fotoni.

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.

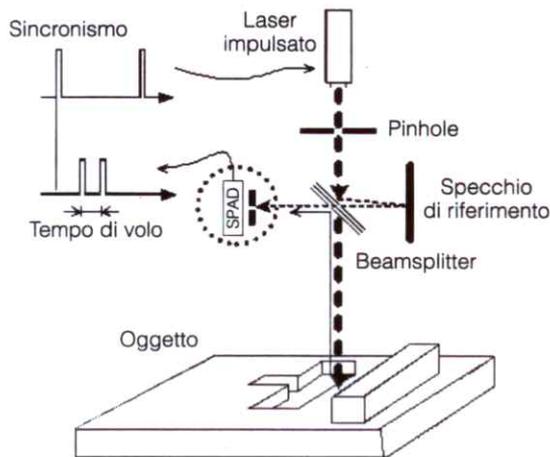


Figura 2 Schema di apparato per monitoraggio e misura di profili di oggetti mediante misure di tempo di volo di singoli fotoni riflessi.

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-

