

1. Record Nr.	TD17092142
Autore	CUCCATO, ANDREA
Titolo	Development of electronic systems for single photon avalanche diode arrays [Tesi di dottorato]
Editore	Politecnico di Milano, info : eu-repo/date/embargoEnd/2017-01-28
Lingua di pubblicazione	Inglese
Formato	Tesi di dottorato
Livello bibliografico	Monografia
Note	diritti: info:eu-repo/semantics/embargoedAccess
Sommario	<p>Negli ultimi anni la ricerca scientifica in campo chimico e biomedico si è sempre più focalizzata sull'utilizzo di analisi di tipo ottico, allo scopo di comprendere meglio i processi biologici. Il carattere non-invasivo di queste misure le rende infatti una soluzione ottima per esperimenti in-vivo e per la diagnostica in ambito medico. Questo trend ha spinto la ricerca nel campo dell'elettronica a sviluppare fotorivelatori dalle elevate presetazioni, per poter soddisfare le richieste stringenti imposte dalle applicazioni. Ad esempio, tecniche di single-molecole spectroscopy (SMS) si sono rapidamente affermate nel campo della biologia e della biochimica. Questa tecnica utilizza campioni estremamente diluiti, pertanto necessita di fotorivelatori con sensibilità elevata e basso rumore; al giorno d'oggi i fotorivelatori a singolo fotone rappresentano la migliore risposta e queste richieste. Spinta da una forte richiesta di setup di misura paralleli, la ricerca negli ultimi anni incrementato notevolmente le performance degli array di SPAD (single-photon avalanche diode). Infatti un approccio di tipo multispot consente di ridurre significativamente i tempi di misura, rendendo possibile lo studio di processi che evolvono rapidamente in analisi come SMS, single-molecole Förster resonance energy transfer (smFRET) e fluorescence lifetime imaging microscopy (FLIM). Inoltre, la risposta temporale del rivelatore a singolo fotone è di fondamentale importanza quando la tecnica di time-correlated single-photon counting (TCSPC) è utilizzata</p>

per misurare curve di fluorescenza con una risoluzione temporale inferiore al nanosecondo. Al giorno d'oggi, i sensori di imaging allo stato dell'arte integrano migliaia di rivelatori a singolo fotone all'interno dello stesso chip. Ad esempio, l'impiego di una tecnologia CMOS consente di integrare nel pixel sia il fotorivelatore, sia i circuiti per la conversione time-to-digital. In questo modo è possibile realizzare matrici di SPAD di grandi dimensioni per applicazioni di time-resolved imaging con elevato frame-rate, come laser ranging (LIDAR) o FLIM. Tuttavia, le performance di questi rivelatori non sono al livello dello stato dell'arte, che è invece rappresentato da SPAD (e array di SPAD) realizzati con un processo di fabbricazione custom. Di contro, per questi ultimi il numero di pixel che è possibile integrare in un singolo chip è limitato a causa di problematiche di signal routing on-chip. Inoltre, per poter sfruttare al meglio le performance del fotorivelatore è necessario impiegare una struttura ibrida CMOS-custom, che tuttavia comporta problematiche di signal routing off-chip, oltre ad un incremento notevole dell'occupazione di area. Con l'obiettivo di superare il tradeoff esistente tra parallelizzazione e incremento delle performance, nel nostro gruppo di ricerca è stato progettato un sistema completo a 32 canali per misure di TCSPC che implementa un array lineare di 32x1 SPAD. Parte di questo sistema rappresenta l'oggetto principale del lavoro di tesi che sarà presentato nei prossimi capitoli. Esso consiste nel progetto e nella realizzazione di uno strumento di misura a 32 canali paralleli per analisi a singolo fotone con elevata risoluzione temporale (time-resolved single-photon counting), il quale consente di effettuare analisi di single-photon counting come modulo stand-alone, in alternativa può essere utilizzato come detection head assieme ad un sistema di elaborazione TCSPC multicanale. Le basi di questo lavoro sono rappresentate da una detection head a 8 canali, realizzata in un precedente lavoro di tesi, e dall'esperienza acquisita nello sviluppo di un modulo completo a singolo canale per misure di TCSPC. Il modulo time-resolved a 32 canali sfrutta le elevate performance dell'array lineare di 32x1 SPAD, il quale è utilizzato congiuntamente ad un array di 32x1 AQC realizzato in tecnologia CMOS. L'utilizzo di questa struttura ibrida ha reso necessario affrontare problematiche come signal routing, crosstalk elettrico tra segnali paralleli, connettività, gestione delle alimentazioni, dissipazione di calore e sviluppo di opportune soluzioni per il packaging. In particolare, l'implementazione di un sistema di controllo della temperatura del SPAD, necessario per ridurre i dark counts, ha richiesto notevoli sforzi progettuali. La detection head è stata caratterizzata in modo esaustivo e parametrico. I risultati in termini di dark count rate, probabilità di afterpulsing, photon-detection efficiency e crosstalk ottico si sono rivelati in linea con altri SPAD realizzati in tecnologia custom. Inoltre, la system response function a fronte di un evento di photon-detection è risultata inferiore a 60ps FWHM ad un count rate medio di 1Mcps per canale, pertanto in linea con le specifiche attualmente richieste da misure di TCSPC multidimensionali. Durante questo lavoro di tesi è stata anche realizzata una detection head a 64-canali per misure di single-photon counting. Infatti, nel nostro gruppo di ricerca sono stati recentemente sviluppati array 2-D di SPAD e SPAD con elevata efficienza alle lunghezze d'onda del rosso. La nuova detection head è stata realizzata per poter utilizzare queste nuove tipologie di SPAD all'interno di setup di misura, andando così incontro ad una richiesta crescente di elevate performance ed elevato throughput di misura per applicazioni in campo biochimico. Nella nuova detection head il numero di canali è

stato incrementato a discapito di un peggioramento della risoluzione temporale. Tuttavia, i due sistemi sviluppati durante questo lavoro di tesi (rispettivamente il modulo a 32 canali e quello a 64 canali) sono complementari, e ciascuno ha come target uno specifico range di applicazioni. Infine, possono essere considerati come un tentativo di investigare il limite del tradeoff tra performance e parallelizzazione per sistemi basati su SPAD realizzati in tecnologia custom. In recent years, the biomedical and chemical research has focused on optical analysis to better understand biological processes, indeed these non-invasive measurements are the best solution for in vivo experiments and medical diagnostic tests. This trend has pushed the research in the electronic field towards the development of high-performance photodetectors, in order to meet the strict requirements imposed by applications. As an example, in the last decades single-molecule spectroscopy (SMS) has rapidly grown in the biomedical and biochemical field. The technique involves examining very low concentration samples, therefore it requires photodetectors with extremely high sensitivity and low noise, and nowadays the best answer to these requirements is represented by single-photon detectors. In particular, great achievements in single-photon avalanche diode (SPAD) arrays have been recently made, pushed by a growing demand for parallel experimental setups. Indeed a multispot approach significantly reduces the measurement time, allowing the study of fast dynamic processes in analysis such as SMS, single-molecule Förster resonance energy transfer (smFRET) and fluorescence lifetime imaging microscopy (FLIM). Moreover, the temporal response of the single-photon detector is of utmost importance when the time-correlated single-photon counting (TCSPC) technique is employed to obtain fluorescence decay curves with subnanosecond time resolution. Nowadays, state-of-art imaging sensors integrate thousands of single-photon detectors on the same chip. As an example, devices designed in CMOS technology make possible to integrate the detector and circuits for time-to-digital conversion within the pixel, thus allowing the fabrication of large 2-D SPAD arrays for high frame-rate time-resolved imaging applications, like laser ranging (LIDAR) or FLIM. However, from the detector point of view, these systems suffer from poorer performance with respect to the best in literature, which is represented by SPADs (and SPAD arrays) developed in a customized technology process. As a drawback, the latter limits the number of pixels that can be integrated in a single chip, due to on-chip signal routing issues. Moreover, to exploit the best detector performance, a hybrid CMOS-custom technology pixel structure has to be implemented, which leads to off-chip signal routing issues and increased area occupation. To break the strong tradeoff between performance improvement and parallelization, in our research group a complete 32-channel system for TCSPC measurements, based on a custom-technology 32x1 linear SPAD array, has been designed and fabricated with the aim to maximize the detector performance. Part of this complete system constitutes the main subject of this thesis work, which involved the design and fabrication of a compact 32-channel time-resolved single-photon detection instrument, capable of performing single-photon counting analysis as a stand-alone module, and TCSPC analysis when connected to a multichannel TCSPC instrument. The basis of this project are represented by a 8-channel detection head, developed in a previous thesis work, and the experience acquired from the development of a complete single-channel TCSPC instrument. The 32-channel time-resolved detection head exploits the extremely high

performance of the 32x1 custom-technology SPAD array, which works in conjunction with a 32x1 CMOS AQC array. However, this hybrid architecture has led to many design issues to deal with, like signal routing, electrical crosstalk between parallel channels, connectivity, power management, heat dissipation and the development of suitable packaging solutions. In particular, many efforts have been required to implement a SPAD temperature control that allows to significantly reduce the dark counts. A complete and parametric characterization of the detection head has been performed. Results are in good agreement with SPADs developed in a custom technology process, in terms of dark count rate,

Localizzazioni e accesso

http://memoria.depositolegale.it*/http://hdl.handle.net/10589/89522
