

Università degli studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA "G.GALILEI"

Corso di laurea triennale in fisica

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA

Studio di sensori a pixel per tracciatori di particelle cariche

basati su diodi a valanga in silicio

Candidato:

Giulio Stibelli

Matricola:1026609

Relatore:

Prof. Gianmaria Collazuol

Indice

- 1. Introduzione
- 2. Breakdown voltage e Conteggi di buio
- 3. Risoluzione temporale
- 4. Caratterizzazione con fotoni
- 5. Misure con elettroni
- 6. Conclusioni

Introduzione

Il sensore APIX è un prototipo per un possibile tracciatore innovativo di particelle cariche con alta risoluzione spaziale e temporale. Il lavoro di questa tesi costituisce la caratterizzazione di APIX.

APIX è formato da celle in silicio indipendenti che rivelano la posizione di passaggio della particella carica incidente. Il dispositivo è composto da due chip: il chip "figlio" (chip2 6mm²) e il chip "padre" (chip1 8 mm²). Ogni chip è composto da 48 x 8 pixel (48 colonne e 8 righe). Ogni pixel include un diodo del tipo Single Photon Avalanche Diode (SPAD) e comprende sia l'elettronica che serve a digitalizzare il segnale del diodo sia quella che permette di fare misure di cross-talk e conteggi di buio (Dark Count Rate, DCR). I due chip sono affacciati dal lato attivo ed uniti attraverso punti di saldatura (bonding, uno per ogni cella) in modo da avere corrispondenza di celle a due a due. I diodi funzionano in modo Geiger e dunque il passaggio di una particella carica per una singola cella produce lo stesso segnale che viene prodotto da una coppia elettrone/lacuna generata termicamente (conteggio di buio). I segnali di uscita di due celle corrispondenti vengono mandati all'ingresso di una porta logica AND (tale elettronica sta sul chip "padre", il segnale arriva dal chip figlio attraverso il bonding), la cui uscita ON indica il passaggio di una particella. In tal modo la coincidenza temporale di due celle (una del "padre" ed una del "figlio") corrispondenti indica il passaggio di una particella ionizzante attraverso i chip. Cosi` si mitiga l'effetto dei conteggi di buio che hanno una frequenza piuttosto elevata per la singola cella funzionante in modo Geiger.



APIX e` un prototipo che ha lo scopo di dare indicazioni su diverse possibili configurazioni e tipologie di SPAD per ottimizzazione in vista di future applicazioni. I chip "padre" e "figlio" includono dunque diversi tipi di SPAD. Questi sono suddivisi in due tipi principali che si differenziano per la struttura interna diversa e lo spessore dello strato attivo, 1.5 µm per lo SPAD di tipo 2 (a destra nella figura in basso) che presenta una giunzione profonda, e 1µm per lo SPAD di tipo 1 (a sinistra) che presenta una giunzione superficiale.

Gli SPAD sono ricoperti da uno strato metallico di 100nm che li rende insensibili alla luce ed evita il cross-talk ottico quando i due chip sono uno sopra l'altro per la rivelazione in coincidenza di particelle cariche. Solo gli SPAD dalla colonna 45 alla colonna 48 sono predisposti per misure ottiche non avendo uno strato metallico protettivo (per tali misure si utilizzano chip "padre" o chip "figlio" singoli che non vengono dunque collegati).



Come anticipato, gli SPAD in APIX operano in Geiger-mode, con circuito di spegnimento passivo. Tale circuito di spegnimento ha lo scopo, a seguito di una valanga, di abbassare la tensione ai capi dello SPAD fino alla tensione di breakdown. Il circuito di spegnimento e` progettato in modo che la durata della corrente di valanga deve essere più piccola possibile. In tal modo si assicura che: 1) il riscaldamento del diodo a causa della corrente generata durante la valanga che potrebbe variare la tensione di breakdown sia trascurabile.

2) il numero di portatori che attraversa la giunzione sia piccola così da ridurre i portatori intrappolati e che successivamente si liberano generando una valanga (generando afterpulsing).

Il 90% degli impulsi di afterpulsing avviene entro i 30ns dall'impulso principale. La probabilità di tale impulso dipende dalla probabilità di cattura della carica (proporzionale al flusso di cariche durante la valanga) al tempo di cattura e dalla probabilità di scatenare una valanga.

3) l'emissione di fotoni da parte di portatori dovuto a fenomeni di Bremsstrahlung sia minimo. Tali fotoni potrebbero venire assorbiti da SPAD vicini sullo stesso chip generando valanghe (si parla di crosstalk ottico).

Alternativa al circuito di spegnimento passivo sarebbe quello attivo. Si è scelta l'opzione passiva per la sua maggiore semplicità ed la previsione di lavorare con sorgenti a bassa attività. Si sono usati SPAD molto drogati in modo da avere correnti elevate alla valanga e resistenza di spegnimento dell'ordine di $100K\Omega$ (resistenza variabile) adatta a minimizzare il tempo morto. Di seguito lo schema del circuito di spegnimento dello SPAD e di processamento del segnale fino all'AND dove confluiscono i segnali di celle corrispondenti.



Il mosfet M₁ costituisce la resistenza di spegnimento, ed entra in funzione se anche il mosfet M₂ è polarizzato. M₁ è alimentato a una tensione di 1.5 volt. M₂ serve quindi ad abilitare il circuito dello SPAD. Sul nodo A vi è una tensione a dente di sega, un transistor di bloccaggio serve a livellare la tensione per essere accettata dal comparatore.

L'uscita del comparatore è un onda quadra accettabile per una porta AND che riproduce un uscita alta, se abilitata dall'enable. Per ridurre le coincidenze accidentali, si usa un monostabile subito dopo il comparatore, serve a rendere l'impulso di durata programmabile di 750ps o di 1.5 ns o di 10 ns. Si è scelto di usare una larghezza di 10 ns. L'uscita del monostabile costituisce l'ingresso di un OR che raccoglie il segnale di uscita di degli SPAD di uno stesso chip. La velocità di propagazione del segnale dallo SPAD all'OR di uscita è di qualche ns. La lettura del passaggio di particella avviene su due livelli di memoria 1-bit (flip flop) il primo, il secondo livello è costituito da un shift register per la lettura seriale di SPAD di una riga.



Le grandezze rilevanti che caratterizzano uno SPAD sono in generale: la tensione di Breakdown (il funzionamento di regime Geiger consiste nel forzare il bias del diodo ad una tensione inversa superiore a quella di Breakdown, la differenza tra tensione di bias e breakdown viene indicata come Overvoltage), la rate di conteggi di buio (Dark Counting rate, DCR), la probabilita` di rivelare una coppia elettrone/lacuna (e/h) generata da fotone (Photon Detection Probability, PDP), la probabilita` di rivelare il passaggio di una particella (che produce diverse coppie e/h) ed infine la fluttuazione

nel tempo di risposta del diodo rispetto all'istante della produzione della coppia e/h (risoluzione temporale del dispositivo). Tutte queste grandezze dipendono dall' Overvoltage.

I conteggi di buio si spiegano con i seguenti fenomeni:

1) Trap assisted tunneling (TAT) in cui per l'elevato campo elettrico presente nel semiconduttore, le bande subiscono un piegamento. Per un elettrone passare dalla banda di valenza a quella di conduzione è necessaria un'energia $E_{GAP}/2$ senza la necessità di passare attraverso un centro di ricombinazione.

2) Schockley-Read-Hall (SRH) per cui l'elettrone acquisisce sufficiente energia termica per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione passando per un centro di ricombinazione (impurezza) situato a metà tra le due bande. L'energia di attivazione è di $E_{GAP}/2$. Questo è il processo preponderante a temperatura ambiente.

3) Diffusione, ma tale fenomeno richiede un energia di attivazione elevata e quindi è presente ad alte temperature, e a temperatura ambiente è trascurabile.

L'efficienza per la rivelazione di una coppia e/h dipende principalmente dalla probabilita` di generare una valanga, che a sua volta e` fortemente dipendente dalla configurazione dei campi elettrici attorno alla giunzione nella cella.

Il lavoro di questa tesi e` consistito nel caratterizzare gli SPAD e APIX con lo studio e la misura delle grandezze appena introdotte.

Breakdown voltage e conteggi di buio

Descrizione apparato sperimentale

Per i conteggi di buio l'apparato sperimentale è costituito da: un'oscilloscopio Lecroy digitale banda 1GHz e frequenza di campionamento 2Gs/s con cui contiamo i segnali di buio, collegato con sonda al rivelatore, un alimentatore di tensione variabile fino a 35V stabilizzato che alimenta gli SPAD, una scheda arduino che serve a programmare il chip APIX ed in particolare ad abilitare alla rivelazione le celle selezionate, una scatola oscura collegata a terra, in modo da proteggere dalla luce e da segnali ambientali il rivelatore posto all'interno e un laser Horiba (emissione a 375nm, impulsi di 40ps rms)

Metodologia di misura

Si acquisiscono i dati di conteggi per secondo con l'oscilloscopio che è programmato per contare forme d'onda che superano oltre una soglia di tensione.

Elaborazione dati

Per trovare sperimentalmente la tensione di breakdown si fitta la tensione di alimentazione dello SPAD preso in considerazione rispetto ai conteggi degli impulsi rilevati per secondo, prendendo valori di tensione sopra una certa soglia perché a una tensione inferiore i segnali non si possono vedere a causa della tensione di soglia del comparatore. Per lo SPAD di tipo 1 ho quindi una tensione di breakdown ~ 18,1 volt (ottenuta come rapporto tra intercetta alle ordinate e coefficiente angolare). La tensione di soglia del comparatore risulta di 0,7 volt, come è stato in effetti impostato.



DCR breakdown voltage

Per lo SPAD di tipo 2 si ottiene una tensione di breakdown di 21,5 volt e la soglia del comparatore sempre a 0.7 volt.



Si noti come i conteggi di buio sono minori per lo SPAD di tipo 2 questo si spiega con la struttura diversa, il tipo 1 è più prono a DCR.

Le stime ottenute sono compatibili con le misure su altri chip caratterizzati sistematicamente. Per tutte le celle di tipo diverso si è quantificata la tensione di breakdown di ogni SPAD su uno stesso chip e si è visto che la varianza della tensione suddetta per uno stesso chip è minore di 20mV.



Risoluzione temporale

Descrizione dell'apparato di misura e metodologia di misura

L'apparato sperimentale consiste di un laser Horiba (375nm - ∆t≈40ps RMS) e del rivelatore inclusi entrambi all'interno di una scatola nera. Il laser produce un'impulso luminoso di larghezza circa 40ps RMS e fornisce in uscita un segnale di trigger che fa anche da riferimento temporale (T0), è impostato alla frequenza di trigger di 200KHz.

La cella selezionata per tale misura è quella appartenente alla riga 1 e colonna 43 (sono fra quelle celle predisposte per la rivelazione di fotoni). L'apparato sperimentale consiste di una scheda arduino con cui programmiamo APIX e una scheda elettronica Time Correleted Single Photon Counting (TCSPC) che unisce l'intervallo di tempo tra due segnali (Start e Stop). Come start abbiamo usato il trigger del laser e come stop l'uscita OR di riga di APIX aggiungendo un ritardo fisso per far rientrare la Δt (T_{stop}-T_{start}) nel range di funzionamento di TCSPC. La risoluzione del TCSPC è migliore di 5ps.

Elaborazione dei dati



10

Come si vede dalla figura ottengo due picchi separati di 500 ps, con varianza di 87 ps per il primo picco. Si vede anche una spalla corrispondente a un terzo picco non risolto. Per vedere se i tre picchi sono attribuibili all'elettronica o allo SPAD o al laser, si è rimpiazzato lo SPAD con un SiPM. Con il SiPM il segnale è privo dei picchi, quindi il laser non è il responsabile di questo andamento. È possibile che sia dovuto a cross talk elettrico, tra le due linee del segnale d'OR di riga in uscita dal circuito (l'OR di riga è duplicato per permettere la rilevazione di cross talk tra diverse righe del chip).

Le code di sinistra sono attribuibili ad afterpulsing e conteggi di buio, mentre i conteggi di destra sono solo conteggi di buio dovuti a stop accidentali. Per 4 tensioni sopra al breakdown si è presa quindi la larghezza a meta altezza del picco più alto, i valori di risoluzione sono in tabella.

Di seguito i valori di FWHM con la tensione di alimentazione dello SPAD e della risoluzione temporale che è il rapporto della larghezza a metà altezza del segnale, con il tempo corripondente al massimo dell'impulso che è intorno ai 25ns. Di seguito il plot dei dati di tensione di alimentazione e larghezza a metà altezza.



Si vede che con overvoltage V_{ov}>1V la risoluzione cresce leggermente con V_{ov}. Per piccoli valori di V_{ov} (come per tensione di alimentazione di 18,5) la risoluzione è rovinata dal'effetto della soglia del comparatore.

Caratterizzazione dei sensori a pixel con i fotoni

Un chip "padre" e` stato caratterizzato illuminandone le celle non coperte da metal. In tal modo e` stato possibile stimare l'efficienza di rivelazione per fotoni degli SPAD utilizzati in APIX.

Descrizione dell'apparato

L'apparato di misura si compone della scatola nera con led e rivelatore al suo interno, scheda arduino per selezionare la cella rivelatrice, alimentazione impulsata per i led (100KHz), oscilloscopio Lecroy digitale settato ad acquisire il segnale del rivelatore in una finestra temporale di 50ns dal segnale di trigger dell'alimentatore, e riga millimetrica per fissare le distanze tra sorgente e rivelatore. I led sono stati tutti attenuati e collimati in modo che emetta in una direzione in modo uniforme entro un certo cono angolare. La larghezza dell'impulso di tensione di alimentazione del diodo è circa 1ns. Si è lavorato a temperatura ambiente dato che la DCR è bassa. Si è usato anche un laser per vedere la variazione dell'efficienza con l'overvoltage con molti fotoni per cella. Le misure sono state ottenute alimentando il fotodiodo alla tensione di 20 volt (over voltage di 2 volt), il tempo di ritardo, ovvero il tempo che intercorre tra l'emissione del fotone e la generazione del segnale è di circa 22ns.

Metodologia di misura

Abbiamo misurato la Photo Detection Efficiency (PDE) e successivamente l'efficienza quantica delle celle (QE). L'espressione che lega queste grandezze e` la seguente:

$$PDE = FF \cdot P_{triager} \cdot QE$$

Dove FF è il fill factor (frazione di area fotosensibile e attiva rispetto all'area totale che comprende anche l'elettronica integrata, che costituisce zona non attiva). Nel caso di celle APIX si ha:

$$FF = \frac{40 \times 40 \,\mu m^2}{50 \times 75 \,\mu m^2} = 0.43$$

P_{trigger} (probabilità di trigger) è la probabilità per una coppia elettrone lacuna di innescare una valanga. La probabilita di trigger varia con la lunghezza d'onda del fotone incidente e con l'over voltage. Si vogliono ottenere PDE e QE in funzione della lunghezza d'onda del fotone emesso.

L'oscilloscopio è impostato per contare gli impulsi generati dal fotodiodo in una finestra temporale di 50ns successivi al trigger dato dall'impulsatore del led o del laser, in modo da rendere trascurabile l'effetto delle accidentali da DCR, e dà direttamente il rapporto R tra fotoni rivelati e numero di impulsi di trigger. Tale rapporto è la PDE moltiplicata il numero medio di fotoni per cella per bassi valori di fotoni per cella. Per ricavare il numero assoluto di fotoni in media per impulso (trigger) per cella si è utilizzato il metodo 1/r² e un diodo calibrato. Il numero di fotoni per cella è ricavato con un diodo calibrato ancora misurando a varie distanze dalla sorgente. Per ogni lunghezza d'onda si raccolgono vari rapporti R per diverse distanze della sorgente dal rivelatore. Il diodo misura la potenza assorbita ed è collimato in modo da essere esposto per una area attiva ben

$$P = \frac{A}{(x+r)^2}$$

con A costate di normalizzazione e r offset incognito entrambe quantità ricavate dal fit. Tale potenza si può convertire in numero di fotoni per cella con la formula:

$$\mu = \left(\frac{A}{(x+r)^2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\nu}\right) \cdot \left(\frac{1}{\frac{hc}{\lambda}}\right) \cdot \left(\frac{0.05^2}{(\frac{1}{4} \cdot \pi)}\right) = \frac{c}{(x+r)^2}$$

Dove c corrisponde quindi al numero di fotoni per cella. Il diodo calibrato ha un foro di collimazione di 1 mm (raggio 0,05cm), v è la frequenza di trigger di 100Khz dei led.

Prima di ogni misura ci si è messi a distanze tali da ricevere un fotone alla volta in modo da verificare se è possibile la rivelazione del singolo fotone in media.

Elaborazione dati

Da queste misure si ricavano i fit quadratici tra:

1) rapporto R di fotoni rivelati e trigger, e distanza

2) potenza assorbita dal diodo calibrato e distanza

Le misure interessanti per ricavare il numero di fotoni per cella sono quelle in cui rivelo in media meno di un fotone per cella, infatti a questo limite la distribuzione poissoniana dei fotoni è la PDE moltiplicata per il numero di fotoni per cella.

La distanza misurata tra sorgente, rivelatore o diodo calibrato si è ottenuta con una riga millimetrica e l'offset incognito si è ricavato con il fit.

Figura rapporto R a 370nm



Grafico potenza distanza



Con S si intende la quantità: $S = \frac{1 - e^{-\mu(x) \cdot PDE}}{\mu(x)}$ che nel limite di meno di un fotone per cella ($\mu < 1$)

fornisce la PDE.

Grafico distanza e S, i dati utili per l'efficienza sono gli ultimi tre.



Si usano i valori di PDE ottenuti, solo quelli corrispondenti ad un numero per fotoni per cella minori di 1.



Al fine di calcolare l'efficienza quantica si usano i valori della probabilita di breakdown ottenuti dai colleghi di Trento per (con cui collaboriamo) per la stessa tipologia di SPAD.



I valori calcolati dell'efficienza quantica per ogni lunghezza d'onda usata mostrati di seguito in tabella. Per gli errori si è usata la deviazione standard della distribuzione binomiale.

Q.E (%)		Λ (nm)
12,33	±0,26	370
49,87	±0,73	430
35,76	±0,50	525
22,78	±0,35	630

Per verificare l'andamento della breakdown probability misurata a Trento si è studiata la PDE in funzione dell'overvoltage. La PDE (moltiplicata in questo caso per il numero medio di fotoni per cella, pari a circa 2) alla lunghezza d'onda di 375nm è riportata in grafico in funzione dell'overvoltage .



Si nota che dopo aver raggiunto un valore massimo attorno a 20.5V la PDE cala leggermente per tensioni maggiori per effetto del tempo morto nella misura dovuto agli accidentali (DCR)

Misure con Sorgente di elettroni

Un dispositivo APIX completo (ovvero costituito da chip "padre" e "figlio" collegati) e` stato esposto ad una sorgente di elettroni di bassa energia (MeV) per validarne il funzionamento come rivelatore di particelle ionizzanti.

In particolare e` stata utilizzata una sorgente ⁹⁰Sr con attivita` di 39kBq (stimata con errore di 5%) distribuita uniformemente su una superficie attiva di circa 2cm². La sorgente e` stata posizionata a distanza di circa 6mm dal sensore su un collimatore (di plexiglass) con foro circolare di 4mm di diametro (vedere figura) e all'interno di una camera climatica. Le misure sono state compiute alla temperatura di 5°C per minimizzare il contributo del rumore di buio (DCR). Le misure consistono nella determinazione del numero delle coincidenze di celle del chip "padre" con le corrispondenti celle del chip "figlio" per secondo (misura della rate di coincidenze).

Alla temperatura di 5°C, con overvoltage di 2V e senza sorgente, la rate di coincidenze misurata e` pari a circa 90mHz per cella (ovvero 15Hz complessivamente sulle 192 celle attivate del sensore, corrispondenti a circa 1mm²) che e` in accordo con la stima *Illustration 1:* che ci si attende dalle misure della rate media di singola cella, attraverso

Geometria e specifiche della sorgente 90Sr



Illustration 2: foto di chip e collimatore di plexiglass

espressione:

$$DCR_{C} = DCR_{1} DCR_{2} 2\Delta T$$

dove DCR_C e` la rate di conteggi di buio di coincidenza, DCR_{1.2} sono le rates di conteggi di buio delle singole celle di "padre" (1) e "figlio" (2) e ΔT e la lunghezza temporale dei segnali che formano la coincidenza.

In presenza della sorgente si misura una rate di coincidenza totale di 130mHz che indica un contributo della sorgente di 40mHz in media per cella (6.8Hz sulle celle attivate).

Per validare il risultato abbiamo condotto una simulazione con il codice PENELOPE (*F. Salvat, et al PENELOPE-2011: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport OECD NEA Data Bank/NSC DOC(2011)/5*). PENELOPE e` una simulazione di tipo Monte-Carlo che tratta il trasporto e l'interazione accoppiata di elettroni, positroni e fotoni da energie di 10eV fino a diversi GeV. Le interazioni di fotoni (scattering Rayleigh e Compton, assorbimento fotoelettrico e creazione di coppie), l'annichilazione dei positroni e le interazioni "dure" di elettroni e positroni (scattering elastico, inelastico e bremsstrahlung) sono simulate in dettaglio. Le interazioni "soffici" di elettroni e positroni sono calcolate con approcci di approssimazione numerica di scattering multiplo.

La geometria del setup simulato in dettaglio e`illustrata in figura (sezione verticale),

dove si vede la sorgente in basso, il collimatore



(colore marrone), la coppia di chip alloggiata sul pcb (verde, in alto). Il volume complessivo (aria) con contiene il setup e` illustrato in giallo. Un elemento importante per ottenere un'accurata simulazione in tempi rapidi e` la definizione dei passi massimi con cui le particelle vengono seguite nei vari mezzi. In particolare mentre in aria il passo massimo e` di 1mm, nel silicio le particelle sono seguite con passi massimi di 0.1µm.



Nella figura di fianco e` mostrato lo spettro di energia delle particelle in uscita dalla sorgente. Si vedono chiaramente le due componenti di spettro di decadimento beta di 90Sr (end point a circa 600keV) e 90Y (end point a circa 2500keV) che risulta dal decadimento di 90Sr.

Dalla simulazione si vede che nello strato di silicio non attivo (zona neutra, spessa circa 480µm) dei singoli chip, le particelle perdono circa 120keV di energia in media, con notevoli code fino a 300keV (vedere figura sotto a sinistra). Mentre nella zona attiva dei chip (spessa circa 1.5µm) il rilascio di energia e` in media di circa 300eV per cella (vedere figura sotto, a destra), che corrispondono alla produzione di circa 80 coppie elettrone/lacuna (3.6eV spesi per la creazione di una coppia e/h).



Si osserva che la presenza di 80 coppie e/h porta alla saturazione molto rapida della probabilita` di trigger della valanga anche a basso overvoltage.

Si sono simulate complessivamente 10⁷ elettroni uscenti dalla sorgente. Normalizzando con l' attivita` della sorgente utilizzata per le misure (39000 elettroni uscenti per secondo) si e` ottenuta una stima di 7.3Hz di conteggi per le celle attivate nella misura. Considerando un errore dell'ordine del 5% nella stima dell'attivita` della sorgente, il risultato della simulazione e` in ottimo accordo con il valore misurato (6.8Hz).

Conclusioni

In questo lavoro di tesi si sono studiati gli SPAD da cui sono costituiti i chip che compongono il sensore a pixel APIX per particelle cariche. Si è misurata la tensione di Breakdown e verificata la bassa DCR che caratterizza il nostro dispositivo. La risoluzione temporale misurata (circa 100ps) e` il linea con le attese. La PDE misurata e` anch'essa in linea con misure ottenute con SPAD simili.

Infine abbiamo dimostrato la sensibilita` di APIX alle particelle ionizzanti esponendo il dispositivo completo (due chip bondati) ad una sorgente beta e osservando il conseguente incremento di conteggi. Una simulazione dettagliata del setup ha corroborato la validita` delle nostre misure.