

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettronica



PROGETTO E CARATTERIZZAZIONE PRELIMINARE DI PIXEL PER L'ACQUISIZIONE SIMULTANEA DI IMMAGINI DIGITALI NEL VISIBILE E VICINO INFRAROSSO

Relatore:

Prof. Giacomo LANGFELDER

Correlatore:

Prof. Antonio LONGONI

Tesi di Laurea Specialistica di:

Alessandro Crotti

Matr. 749896

Anno Accademico 2011/2012

SOMMARIO

1	<u>INTRODUZIONE</u>	1
1.1	STATO DELL'ARTE DEI SENSORI	5
1.1.1	COLORED FILTER ARRAY	5
1.1.2	SENSORE FILTERLESS : FOVEON X3	7
1.1.3	SENSORE FILTERLESS : TFD TRANSVERSE FIELD DETECTOR	9
1.2	ACQUISIZIONE SIMULTANEA RADIAZIONE VISIBILE E INFRAROSSA	11
1.3	APPLICAZIONI DELL'INFORMAZIONE NIR	13
1.3.1	HDR	13
1.3.2	COLOR IMAGE DEHAZING	20
1.3.3	BACKGROUND/FOREGROUND SEGMENTATION	21
1.3.4	LUCE STRUTTURATA E IDENTIFICAZIONE DELLA SUPERFICIE DEGLI OGGETTI	23
1.4	METODI DI ACQUISIZIONE DELL'INFORMAZIONE INFRAROSSA	25
1.4.1	ACQUISIZIONE TRAMITE MODIFICHE AL CFA O TRAMITE PARTICOLARI FILTRAGGI.	25
1.4.1.1	Colored Filter Array modificato	26
1.4.1.2	Acquisizione mediante filtro separa colore	29
1.4.2	TECNICHE CHE SFRUTTANO L'ASSORBIMENTO DEL SILICIO.	31
1.4.2.1	Sensore di immagine con VIPPS (Vertically Integrated Photodiode Structure).	31
1.5	POSSIBILITÀ DI UTILIZZO DEL TFD PER QUESTI TIPI DI MISURE E SUOI VANTAGGI	32
2	<u>IL TFD A 4 CANALI PER VISIBILE E INFRAROSSO</u>	37
2.1	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	37
2.2	SIMULAZIONI MATLAB SEMPLIFICATE	40
2.3	CRITERI DI OTTIMIZZAZIONE	45
2.3.1	FEDELE RIPRODUZIONE DEL COLORE	45
2.3.2	BASSA PROPAGAZIONE DEL RUMORE ELETTRONICO	49
2.3.3	EFFICIENZA QUANTICA ALLA LUNGHEZZA D'ONDA DI INTERESSE	53
2.3.4	SCELTA DELL'OTTIMO	53
3	<u>DESCRIZIONE TECNOLOGIA E IMPLEMENTAZIONE DELLA TECNOLOGIA IN DESSIS</u>	56
3.1	SIMULAZIONI PRELIMINARI	58
3.2	STRUTTURA TFD	59

3.2.1	POLARIZZAZIONE	63
3.2.2	FINESTRATURA	64
3.2.3	VALUTAZIONE RISPOSTE SPETTRALI E ITERAZIONE PER LA SCELTA DELL'OTTIMO	67
3.2.4	STRUTTURA OTTIMA	68
3.3	LAYOUT	70
4	SETUP SPERIMENTALE	76
4.1.1	SORGENTE LUMINOSA	77
4.1.2	MONOCROMATORE	78
4.1.3	CHOPPER OTTICO	78
4.1.4	OTTICA	79
4.1.5	SCHEDA DI LETTURA	79
4.1.6	LOCK-IN	80
4.1.7	SCHEDA DI ACQUISIZIONE	81
4.1.8	LABVIEW	81
4.2	APPROFONDIMENTO DELLA SCHEDA DI LETTURA	82
4.2.1	POLARIZZAZIONE E AMPLIFICAZIONE	82
4.2.1.1	Mux	88
4.3	APPROFONDIMENTO DEL PROGRAMMA LABVIEW	91
4.4	MISURE SPERIMENTALI	93
4.4.1	DIFFERENZA TRA SIMULAZIONI E REALTÀ	93
4.4.2	ILLUMINAZIONE DELL'INTERO DEVICE	96
4.4.3	ILLUMINAZIONE PARZIALE DEL DEVICE	98
4.4.4	RE-DESIGN DEL DISPOSITIVO E NUOVA CAMPAGNA DI MISURE	102
4.5	CONCLUSIONI	104

Elenco delle figure

Figura 1 - Rappresentazione schematica della previsione di evoluzione parallela tra scaling delle tecnologie e diversificazione di queste [1].	1
Figura 2 - Rappresentazione schematica del circolo virtuoso che ha permesso alla tecnologia di progredire durante gli anni. [1]	2
Figura 3 - Rappresentazione schematica di come il circolo virtuoso della figura 2 si è modificato negli ultimi anni. [1]	3
Figura 4 - Rappresentazione di una sezione di un sensore ottico dotato di microlenti che focalizzano la luce incidente sulla parte attiva del sensore.	4
Figura 5 - Rappresentazione del layout di un CFA RGBG di Bayer (sinistra) e risposte relative dei filtri RGB (destra).	6
Figura 6 - Schema di un CFA di tipo RGBW	7
Figura 7 - Grafici del coefficiente di assorbimento di materiali semiconduttori (sinistra) e della lunghezza di assorbimento del silicio (destra).	7
Figura 8 - Rappresentazione della sezione del dispositivo Foveon X3.	8
Figura 9 - Sezione del TFD simmetrico a 3 colori disegnato in tecnologia a 90 nm	9
Figura 10 - (Sinistra) Sezione del TFD simmetrico a 3 colori con evidenziate le diverse impiantazioni ioniche; (centro) sezione dello stesso TFD simmetrico a 3 colori ma con evidenziate le regioni equipotenziali, le traiettorie nere sono ortogonali alle linee equipotenziali e rappresentano il campo elettrico che attira gli elettroni; (destra) sono rappresentati in uno stesso grafico il 3 filtri equivalenti delle risposte spettrali dei 3 anodi V1, V2 e V3 del dispositivo.	10
Figura 11 - Grafico del coefficiente di assorbimento del silicio.	13
Figura 12 - 6 scatti successivi della stessa scena al crescere del tempo di esposizione.	15
Figura 13 - Combinazione dei sei scatti precedenti tramite algoritmi di post processing per ottenere un'immagine ad alto dynamic range.	15
Figura 14 - Sezione del SuperCCD SR; sono rappresentati partendo dall'alto, le microlenti, il filtro di bayer, e la superficie del chip, dove sono evidenziate i fotodiodi 'S' ed 'R'.	16
Figura 15 - Nuovo layout dei filtri colorati con la disposizione EXR	17
Figura 16 - (Sinistra) Rappresentazione della scena tramite la sola informazione RGB proveniente dallo spettro visibile. (Destra) Rappresentazione della scena tramite la sola informazione misurata dallo spettro NIR [14].	18
Figura 17 - Immagine ottenuta tramite la composizione dell'immagine infrarossa e visibile della figura 16 [14].	19
Figura 18 - (In alto) E' rappresentata la scena acquisita solamente tramite le tre risposte spettrali nello spettro visibile. (In centro) E' rappresentata l'immagine tramite l'acquisizione della sola informazione infrarossa. (In basso) E' rappresentata la combinazione delle due acquisizioni tramite algoritmi di post processing [14].	21
Figura 19 - Nelle 2 immagini a sinistra i contorni, in verde, sono stati identificati attraverso la sola informazione dello spettro visibile. (a destra) I contorni sono stati identificati tramite l'utilizzo dell'informazione infrarossa e visibile.	22
Figura 20 - Sistema di proiezione di luce strutturata su una scena, e acquisizione di essa.	24
Figura 21 - (Sinistra) Sezione di un tipico sensore di digital imaging, con rappresentati il filtro infrarosso, i filtri colorati RGB ed il sensore. (Destra) Sono rappresentate le trasmittanze spettrali dei 3 filtri colorati RGB, e del filtro infrarosso.	26
Figura 22 - Sensitività relativa dei 3 canali RGB e del canale W, nel quale è omesso ogni filtraggio ottico.	27
Figura 23 - Sezione trasversale del dispositivo WRGB. Sono mostrate le microlenti, i filtri colorati per i canali RGB, il filtro infrarosso integrato, e i piani di metal.	28

Figura 24 - (Destra) Sezione trasversale del dispositivo, si nota la mancanza del filtro IR e la presenza di un Photonic Crystal. (Sinistra in alto) Sono rappresentate le risposte spettrali dei tre canali RGB. (Sinistra in centro) Risposta spettrale del solo canale IR. (Sinistra in basso) Sottrazione della risposta del canale IR alla risposta spettrale dei canali RGB.....	29
Figura 25 - E' rappresentato un sistema di acquisizione tramite un filtro separa colore, composta dai 2 sistemi di acquisizione, Camera V ed N, e dal filtro separa colore.	30
Figura 26 - (Sinistra) Sezione schematica di un dispositivo con VIPs. (Destra) Layout del dispositivo con rappresentazione colorata delle regioni equipotenziali.	32
Figura 27 - E' una sezione del TFD a 4 colori in geometria asimmetrica realizzato con una tecnologia a 150 nm, in cui sono evidenziate le zone di drogaggio.....	34
Figura 28 - Sezione dello stesso dispositivo mostrato in figura 27; anziché i drogaggi sono rappresentate le linee del campo elettrico che conducono ad ognuno dei 4 anodi. A parte sono specificate le tensioni a cui sono stati polarizzati i 4 anodi per ottenere questo campo elettrico.....	35
Figura 29 - (Sinistra) Sono rappresentati i coefficienti di assorbimento di alcuni semiconduttori semplici e composti. (Destra) E' mostrata la lunghezza di assorbimento del silicio in funzione della lunghezza d'onda.	38
Figura 30 - Rappresentazione schematica del sistema di emissione e acquisizione di luce strutturata.	42
Figura 31 - Sezione del TFD modellizzato tramite Matlab. In figura sono evidenziate le 4 regioni di raccolta e rispettive profondità x_B , x_G , x_R , x_{NIR}	43
Figura 32 - Risposte spettrali del dispositivo schematicizzato in figura 31. I colori delle curve rappresentano l'anodo a cui sono associate, blu, verde, rosso e nero per il Nir.	44
Figura 33 - Rappresentazione grafica delle 3 matching function.....	46
Figura 34 - Rappresentazione grafica di una carta colore (Macbeth Color Checker).	49
Figura 35 - (Sinistra) Particolare delle risposte spettrali a corte lunghezze d'onda $400\text{ nm} < \lambda < 500\text{ nm}$. (Destra) Particolare delle risposte spettrali nell'infrarosso $\lambda > 780\text{ nm}$	52
Figura 36 - (Sopra) Sono riportate le risposte spettrali ottime ottenute tramite iterazione mediante Matlab. Sono mostrate sia le risposte originali del dispositivo, sia quelle ricostruite tramite la trasformazione operata da M_{NIR} . (Sotto) E' riportata la risposta spettrale del canale infrarosso.....	55
Figura 37 - (Sinistra) Profilo di drogaggio, N^+ , ortogonale alla superficie, implementato in Dessis. (Destra) Profilo della combinazione dei drogaggi NWell ed N^+ implementato in Dessis. Entrambe le figure mostrano sulle ordinate la concentrazione [cm^{-3}] di atomi droganti di fosforo, mentre sulle ascisse è riportata la profondità del dispositivo a partire dalla superficie [μm].....	57
Figura 38 - (Sinistra) Profilo della combinazione dei drogaggi, P^+ e strato epitassiale, ortogonale alla superficie, implementato in Dessis. (Destra) Profilo della combinazione dei drogaggi PWell, P^+ e strato epitassiale implementato in Dessis. Entrambe le figure mostrano sulle ordinate la concentrazione [cm^{-3}] di atomi droganti di Boro, mentre sulle ascisse è riportata la profondità del dispositivo a partire dalla superficie [μm].....	57
Figura 39 - Sezione trasversale del TFD a dimensioni minime permesse dalla tecnologia simulato tramite Dessis. Le dimensioni sugli assi sono espresse in micrometri.	58
Figura 40 - Grafico che rappresenta in ordinata la corrente [A] tra i contatti, mentre in ascissa mostra la tensione [V] al contatto N2.	59
Figura 41 - Sezione rappresentativa del pixel TFD a 4 canali asimmetrico implementato in Dessis.	61
Figura 42 - Sezione del TFD simulato tramite Dessis. Sono messe in evidenza le linee di forza del campo elettrico.	63
Figura 43 - Sezione del dispositivo mostrato in figura 42, con evidenziata la zona illuminata tramite la finestratura.	65
Figura 44 - Risposte spettrali assolute espresse in corrente misurata agli anodi dei 4 canali del dispositivo nello spettro compreso tra i 400 nm e i 1100 nm. Le risposte rappresentate sono una interpolazione di quelle ottenute da Dessis tramite Matlab.	66

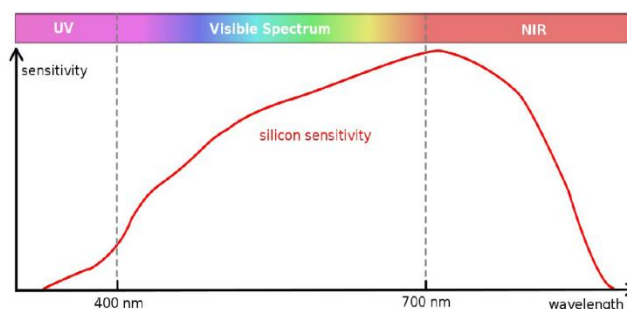
Figura 45 - Sezione della geometria del dispositivo finale. In alto sono riportate le dimensioni dei diversi anodi e STI.	68
Figura 46 - Filtri equivalenti simulati del TFD a 4 canali con la struttura ottima ricercata.	69
Figura 47 - Layout di un singolo Pixel con riportate le dimensioni. Le dimensioni nell'asse z sono quelle di un pixel intero, mentre in figura, per semplicità di rappresentazione, ne è stata troncata una parte.	71
Figura 48 - Ingrandimento della porzione del pixel di figura 47 con evidenziati i nomi dei diversi contatti e delle linee di bus.	72
Figura 49 - Layout del dispositivo intero composto da 24 pixel in parallelo, circondato dal Guard ring.	74
Figura 50 - Layout dell'intero dispositivo, comprensivo anche dei pad.	75
Figura 51 - Rappresentazione mediante schema a blocchi del setup sperimentale utilizzato durante le misure.	76
Figura 52 - Caratteristica della sorgente luminosa misurata in laboratorio mediante fotodiodo di test. Durante questa misura le dimensioni delle fenditure di entrata e di uscita del monocromatore sono state entrambe di $100\mu\text{m}$	77
Figura 53 - Monocromatore Digikrm DK240 utilizzato nelle misure sperimentali.	78
Figura 54 - Rappresentazione schematica dell'amplificatore a transimpedenza utilizzato nella scheda di lettura.	83
Figura 55 - Caratteristica della potenza spettrale di rumore in ingresso all'Opa 124. In grafico è anche riporta la posizione del segnale utile modulato a 6 kHz	84
Figura 56 - Rappresentazione schematica del circuito sottrattore.	86
Figura 57 - Schematico dello stadio di amplificazione di ogni canale del TFD.	87
Figura 58 - Schematico dell'amplificatore a transimpedenza e circuito sottrattore del fotodiodo di riferimento.	88
Figura 59 - Schematico ottenuto mediante Orcad della scheda di lettura completa.	89
Figura 60 - (Sopra) Layout del top della scheda di lettura. (Sotto) Layout del bottom della scheda di lettura.	90
Figura 61 - Finestra di comando del programma di automizzazione della misura fatto in LabVIEW.	92
Figura 62 - Caratteristica della riflettanza spettrale del silicio cristallino illuminato ortogonalmente.	94
Figura 63 - Simulazione della responsività di un fotodiodo in tecnologia LFoundry. In alto con tutti gli strati SiO_2 e Si_3N_4 presenti in caso di 6 metal. In basso per un numero di metal ridotto.	95
Figura 64 - Layout dell'intero dispositivo e ingrandimento di un bordo del dispositivo. E' evidenziata la regione di bordo non ricoperta dalla metallizzazione a cui è attribuita la generazione di cariche di disturbo.	98
Figura 65 - Schematizzazione dell'illuminazione parziale del dispositivo.	99
Figura 66 - Filtri equivalenti ottenuti dalle misure sperimentali dei 4 canali del dispositivo.	100
Figura 67 - Filtri equivalenti simulati tramite Matlab nel capitolo 2, delle risposte spettrali ottime.	101
Figura 68 - Filtri equivalenti del secondo design del dispositivo.	101
Figura 69 - (a) Filtri equivalenti del secondo design del dispositivo con 19 differenti polarizzazioni; (b) esempio di conversione delle fotocorrenti - misurate tramite gli stadi a transimpedenza - nei corrispondenti filtri equivalenti (in alto a destra), efficienze quantiche (in basso a sinistra, unità arbitrarie) ed efficienze quantiche compensate per tenere conto dell'assenza di strati antiriflesso.	103

Abstract

La presente Tesi di Laurea mira ad investigare in maniera preliminare, per un innovativo sensore a pixel in Silicio, le potenzialità di utilizzo nel campo dell'acquisizione simultanea di radiazione nel visibile e nel vicino infrarosso.

Tradizionalmente, i sensori per acquisizione di immagini digitali eliminano mediante un opportuno filtro (chiamato in gergo *hot mirror*) la radiazione proveniente da un oggetto nel vicino infrarosso (si tratta tipicamente di radiazione riflessa, in quanto l'emissione di corpo nero alle tipiche temperature delle scene da fotografare è in questo intervallo di lunghezze d'onda sostanzialmente irrilevante). Per quanto riguarda il lontano infrarosso, i sensori in Silicio sono inerentemente trasparenti in quanto hanno un bandgap di 1.12 eV. Poiché spesso lo scopo di un sistema di acquisizione di immagini è quello di riprodurre fedelmente i colori di una scena, la radiazione infrarossa è tagliata, per stretta analogia con quanto avviene nell'occhio umano, che ne è poi l'osservatore ultimo.

Tuttavia, si può notare che la quantità di segnale rivelabile nella banda compresa tra 700 nm e 1100 nm è rilevante e confrontabile con quanto rivelabile nel visibile per un tipico sensore in Silicio, come mostrato esemplificativamente nella figura sottostante.



Numerose sono le possibili applicazioni di un sistema di acquisizione di immagini che consenta l'acquisizione combinata e la separazione della radiazione nelle dette bande: da un lato il

miglioramento dei dettagli e del range dinamico delle immagini a colori ottenute nei comuni sensori CMOS; dall'altro l'implementazione di nuove funzionalità quali la misura della distanza (3D color imaging) o la segmentazione dallo sfondo dell'immagine di specifici oggetti di interesse. Numerosi esempi di applicazioni si trovano in letteratura e saranno referenziati nel corso del Capitolo 1.

Nella presente Tesi viene progettata, simulata, realizzata e testata una versione prototipale, a quattro bande di acquisizione, del Transverse Field Detector (TFD). In tal modo è possibile ottenere l'acquisizione simultanea di tre bande nel visibile (R, G, B) e una banda nel vicino infrarosso (NIR). I vantaggi potenziali rispetto ad altre tecnologie proposte per operare lo stesso tipo di acquisizioni vengono discussi nel Capitolo 2, e sono sinteticamente: assenza di filtri colorati e/o *hot mirror*; possibilità di evitare algoritmi di demosaicking; medesima risoluzione per le immagini R, G, B e NIR; risposte spettrali che garantiscono la possibilità di utilizzare un efficace algoritmo di separazione delle informazioni acquisite nelle tre bande visibili rispetto a quella infrarossa.

La struttura prototipale, costituita da un array di pixel passivi (cioè senza elettronica di lettura a livello di pixel) letti in parallelo mediante elettronica out-of-chip, viene ottimizzata tenendo conto da un lato dei vincoli tecnologici e dall'altro delle prestazioni ottenibili. La struttura è realizzata in tecnologia CMOS standard a 150 nm a valle di una modellizzazione teorica implementata in *Matlab* e di simulazioni elettro-ottiche effettuate mediante il simulatore *Dessis*. Il Capitolo 3 descrive appunto l'approccio con cui si è giunti a definire la struttura ottima.

Infine la struttura è stata testata mediante l'utilizzo di schede di polarizzazione e lettura dei quattro diversi anodi R, G, B, NIR del TFD. Le schede sono basate su stadi a transimpedenza le cui uscite sono multiplexate e sequenzialmente fornite in ingresso a un lock-in amplifier. La progettazione dell'elettronica di lettura a componenti discreti, una generale descrizione del setup di misura (comprendente una sorgente, un monocromatore, un sistema di focalizzazione ed un chopper ottico) insieme con i primi risultati sperimentali ottenuti per le fotorisposte (e qualitativamente in linea con le previsioni teoriche) vengono presentati nel Capitolo 4.

1 Introduzione

Il digital imaging è un tipico esempio di settore della microelettronica e della sensoristica che ha tratto vantaggio sia dalle conseguenze della legge di Moore (tramite un miglioramento dovuto allo scaling della tecnologia), sia, più recentemente, dal concetto di More than Moore, da qui in poi nominata MTM, cioè dalla possibilità di integrare più funzionalità sul medesimo chip.

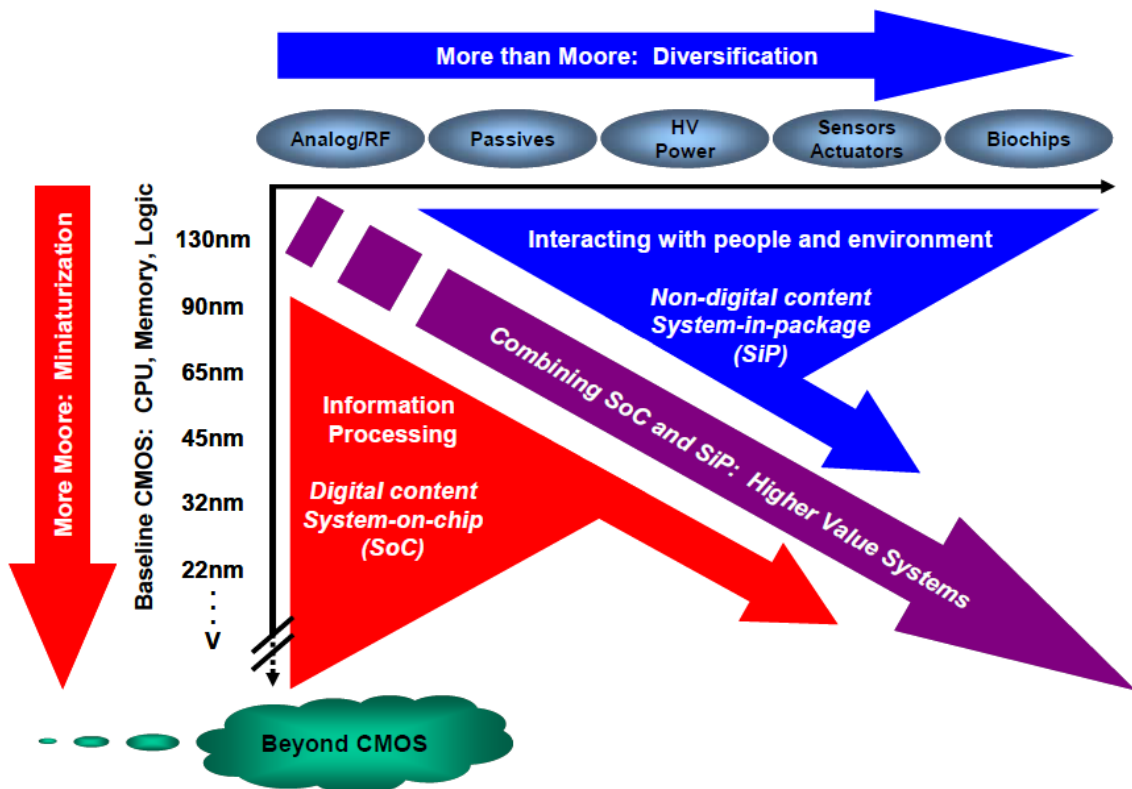


Figura 1 - Rappresentazione schematica della previsione di evoluzione parallela tra scaling delle tecnologie e diversificazione di queste [1].

Il grafico della figura 1, è uno schema dell'evoluzione attuale e futura riguardo il settore della microelettronica; questa schematizzazione mostra sull'asse delle ordinate lo sviluppo tramite la legge di Moore nel tempo, e sulle ascisse lo sviluppo tramite la MTM nel tempo; sulle ordinate viene mostrato come durante gli anni venga migliorato lo scaling dei transistor; invece sulle

CAPITOLO 1

ascisse viene mostrato come nuove applicazioni sfruttino la tecnologia esistente introducendo nuove funzionalità.

La legge di Moore è una legge empirica proposta da Moore in un articolo del 1965, in essa si prospetta un incremento della densità dei componenti su unità di area che sarebbe aumentato esponenzialmente negli anni; questo trend è stato rispettato negli ultimi 40 anni fino ad oggi, con un fattore di miglioramento di 0.7 ogni 2 anni. Questo miglioramento esponenziale dello scaling è stato vantaggioso da molti punti di vista, grazie alla miniaturizzazione dei dispositivi il loro costo è diminuito esponenzialmente, e anche le loro prestazioni sono migliorate. Questo continuo sviluppo ha prodotto un circolo virtuoso che si è autoalimentato negli anni e mostrato in figura 2. Questo circolo virtuoso è stato possibile non solo grazie agli sviluppi tecnologici, che portano allo scaling dei transistor, ma anche alla grande fiducia che questo mercato ha trasmesso agli investitori sulla effettiva validità della legge di Moore, permettendo così alla ricerca di ottenere ingenti investimenti per progredire.

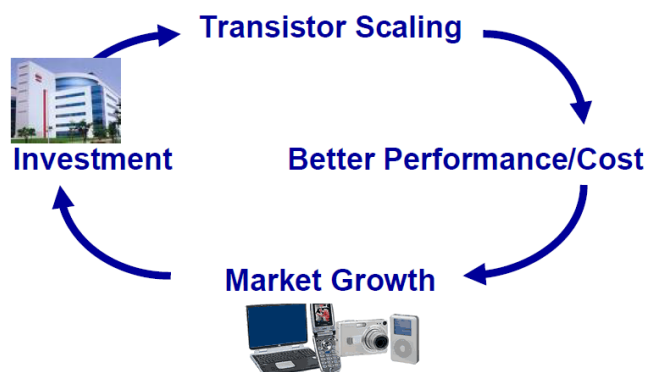


Figura 2 - Rappresentazione schematica del circolo virtuoso che ha permesso alla tecnologia di progredire durante gli anni. [1]

Molti settori della microelettronica si sono appoggiati alla legge di Moore per migliorare le proprie prestazioni, traendo vantaggio dalla maggiore densità di dispositivi per unità di area; il digital imaging, ad esempio, ha tratto il vantaggio di ottenere pixel più piccoli, che hanno reso possibile una maggiore risoluzione, ma anche un miglioramento del Fill Factor e della sensibilità di ogni singolo pixel.

Un nuovo trend, parallelo alla legge di Moore, sta assumendo un'importanza sempre più rilevante, il More than Moore (MTM) [1]; questo trend è caratterizzato da una diversificazione dei dispositivi semiconduttori, e la sua conseguenza principale è l'aggiunta di nuove funzionalità

a questi. Il MTM è un valore aggiunto imprescindibile, che ormai si lega strettamente alla diminuzione dei costi e al miglioramento delle performance, ed è diventato parte integrante del circolo virtuoso alla base del sistema, come è mostrato nella figura 3. Questo nuovo tipo di sviluppo tecnologico, MTM, è stato reso possibile dal circolo virtuoso inizialmente innescato dalla legge di Moore, ed ora lo ha in parte mutato; perchè se prima l'evoluzione nel tempo era valutata solo attraverso la miniaturizzazione, ora il progresso tecnologico deve tenere conto anche della diversificazione dei dispositivi. [2]

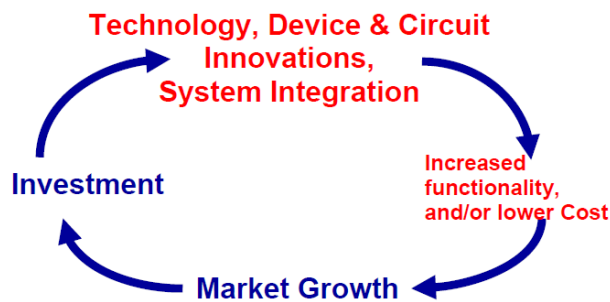


Figura 3 - Rappresentazione schematica di come il circolo virtuoso della figura 2 si è modificato negli ultimi anni. [1]

Il circolo virtuoso innescato dalla MTM ha permesso di introdurre nuovi tipi di funzionalità nei sensori per il digital imaging; queste nuove funzionalità hanno permesso un ulteriore miglioramento delle prestazioni non dovuto solamente allo scaling; fanno parte del progresso tecnologico innescato dalla MTM ad esempio i pixel attivi, cioè pixel la cui informazione acquisita viene preamplificata già nel sensore ottico, migliorandone la sensibilità; un altro tipo di innovazione è stata l'implementazione di microlenti a livello di pixel, le quali permettono di focalizzare la luce incidente nella zona sensibile del dispositivo (come schematizzato in figura 4) migliorandone il Fill Factor; inoltre queste lenti vengono sottoposte ad un trattamento antiriflesso, che riduce la luce riflessa incidente sul dispositivo. A queste funzionalità rese possibili dal processo tecnologico innescato dalla MTM, si stanno affiancando nuovi trend, come ad esempio la possibilità di acquisire immagini ad alto range dinamico, HDR, o la possibilità di acquisire oltre alla radiazione visibile, la radiazione infrarossa, funzionalità che verranno descritte in dettaglio in questo capitolo.

CAPITOLO 1

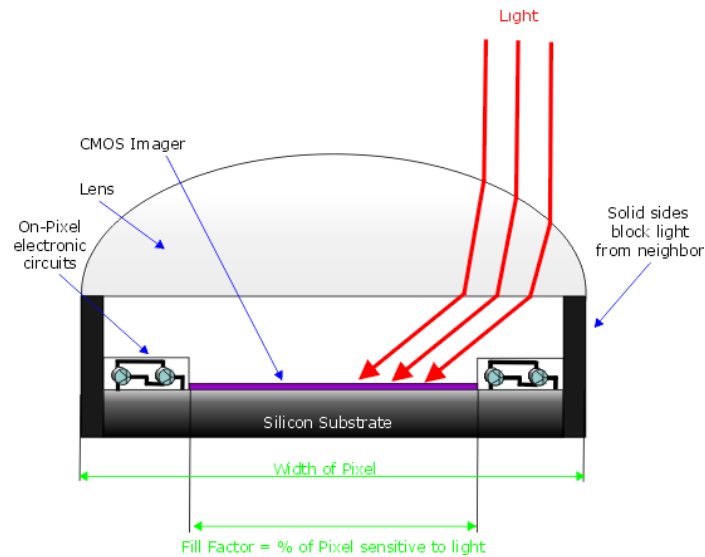


Figura 4 - Rappresentazione di una sezione di un sensore ottico dotato di micro-lenti che focalizzano la luce incidente sulla parte attiva del sensore.

La seguente Tesi si contestualizza in questo ambito, in particolare vuole descrivere lo sviluppo di un nuovo sensore, il TFD (Trasverse Field Detector), che introduce nuove funzionalità rispetto al comune pixel di lettura della radiazione luminosa, migliorandolo e fornendo un valore aggiunto. Il TFD è uno tra i primi pixel monolitici in grado di acquisire la luce attraverso i canali RGB e infrarosso e separarla, e possiede inoltre delle caratteristiche supplementari che lo differenziano dai dispositivi con le stesse funzionalità:

- Il TFD non ha bisogno di matrici di filtri colorati, CFA, per selezionare lo spettro dei canali RGB e infrarosso.
- La risoluzione ottenuta dal TFD è uguale per il canale infrarosso e per i canali RGB.
- Il TFD utilizza un tecnologia CMOS standard.

Lo scopo di questa Tesi è stato quindi quello di progettare il dispositivo tramite i seguenti passaggi:

- E' stata investigata la topologia del dispositivo più adatta all'applicazione desiderata; l'applicazione per cui è stato ottimizzato il dispositivo è stata quella di progettare un sensore che riuscisse a misurare la radiazione infrarossa ad una determinata lunghezza d'onda, oltre che la radiazione visibile con una buona accuratezza di riproduzione del colore; la topologia scelta per questo tipo di applicazione è stata quella del TFD a 4 canali.

- Sono state studiate tramite i software Matlab e Dessis, le prestazioni ottenibili dal dispositivo. Le prestazioni considerate sono state l'accuratezza di riproduzione del colore RGB, l'efficienza quantica del dispositivo in una precisa regione dello spettro infrarosso, e la propagazione del rumore elettronico nel sistema di lettura.
- E' stato progettato e prodotto un prototipo del dispositivo che rispettasse i criteri considerati in fase di simulazione e studio delle prestazioni.
- Infine sono state effettuate delle misure sperimentali, per verificare la corrispondenza tra le caratteristiche del dispositivo simulato e quello reale.

Ora, prima di descrivere il TFD nel dettaglio, si fornirà una panoramica generale dell'attuale stato dell'arte dei sensori.

1.1 Stato dell'arte dei sensori

1.1.1 Colored Filter Array

Una matrice di CFA, Colored Filter Array, è attualmente alla base del tipo di sensore più diffuso. Questo sensore sfrutta, per il riconoscimento della radiazione incidente, un mosaico di filtri colorati, che a seconda delle loro trasmittanze spettrali lascia passare solo certe porzioni di spettro. Il mosaico più comunemente utilizzato è quello di Bayer GRGB [3] mostrato in figura 5. Il filtro di Bayer ha la particolarità di possedere un numero doppio di filtri verdi rispetto a quelli rossi e blu. La numerosità dei filtri verdi è dovuta alla somiglianza tra la trasmittanza del filtro verde, e la somma delle risposte spettrali dell'occhio umano, poichè, come nell'occhio umano, i ricettori di lunghezze d'onda nella regione spettrale del verde sono più numerosi di quelli del blu e del rosso. E' importante notare che le risposte spettrali di questi sensori sono fissate in fase di progettazione dai filtri CFA utilizzati, e non possono più essere modificate. Inoltre, anche in fase di progettazione, le forme spettrali si riducono a quelle ottenibili tramite i materiali compatibili con il processo CMOS. Non è quindi possibile implementare trasmittanze spettrali coincidenti, o combinazione lineare, delle risposte spettrali dell'occhio umano;

l'importanza di avere delle risposte spettrali simili a quelle dell'occhio umano è discussa in particolare nel paragrafo 2.3.1.

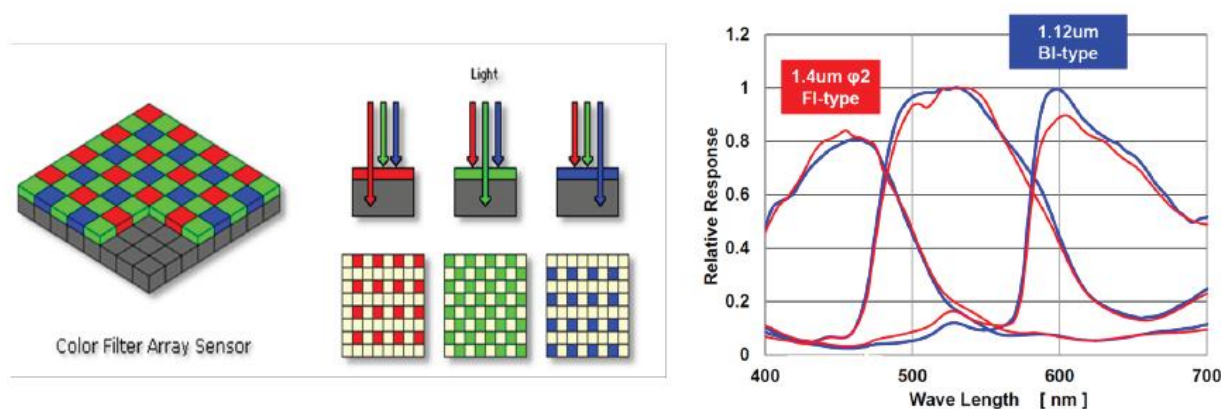


Figura 5 - Rappresentazione del layout di un CFA RGBG di Bayer (sinistra) e risposte relative dei filtri RGB (destra).

Al di sotto di ogni singolo filtro colorato, a seconda della tecnologia utilizzata, c'è un sensore corrispondente che misura la carica elettrica generata dalla luce incidente. Il numero di elettroni generati, e quindi la carica misurata, è proporzionale all'intensità luminosa, mentre l'identificazione della lunghezza d'onda della luce incidente è ricostruita tramite tecniche di interpolazione che sfruttano le informazioni dei filtri adiacenti, chiamate tecniche di demosaicking [2]. Questo principio di funzionamento è sfruttato ugualmente da diversi tipi di sensori, i CCD (Charge Coupled Device), ma anche dai più comuni APS [4] (Active Pixel Sensors). Il filtro di Bayer non è l'unico tipo di CFA utilizzato per catturare l'informazione del colore. Diverse aziende produttrici di sensori utilizzano anche diversi altri tipi di filtri, come ad esempio il filtro RGBW, mostrato in figura 6. Il filtro RGBW, incorpora un quarto filtro oltre a quelli, blu, verde e rosso, un filtro cosiddetto bianco (White), che permette a tutta la luce incidente di essere trasmessa senza filtraggio. Questo quarto canale viene utilizzato per incrementare la sensibilità del dispositivo, e restituisce un'informazione riguardo alla sola luminosità, al prezzo di ridurre l'effettiva risoluzione del sensore.

CAPITOLO 1

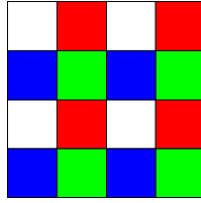


Figura 6 - Schema di un CFA di tipo RGBW

1.1.2 Sensore Filterless : Foveon X3

Un sensore che non sfrutta il filtro di Bayer è il Foveon X3, che è stato proposto dalla ditta FoveonInc. nel 2002 [5] [6]. Questo dispositivo anzichè usare i filtri colorati per separare le lunghezze d'onda, sfrutta invece la proporzionalità del coefficiente di assorbimento del silicio, con la lunghezza d'onda mostrata in figura 7. La conseguenza di questa proporzionalità inversa tra il coefficiente di assorbimento e la lunghezza d'onda, è che le diverse lunghezze d'onda sono assorbite a profondità differenti; in particolare le lunghezze d'onda maggiori come quella del rosso, sono assorbite ad una profondità maggiore rispetto a quelle del blu e del verde. Le lunghezze d'onda del verde a loro volta, vengono assorbite ad una profondità compresa tra quella del rosso e quella del blu, mentre le lunghezze d'onda del blu vengono assorbite tra la superficie del dispositivo e la profondità di assorbimento del verde. Il principio di funzionamento del Foveon, si basa proprio sulla raccolta a differenti profondità delle cariche generate dalla luce.

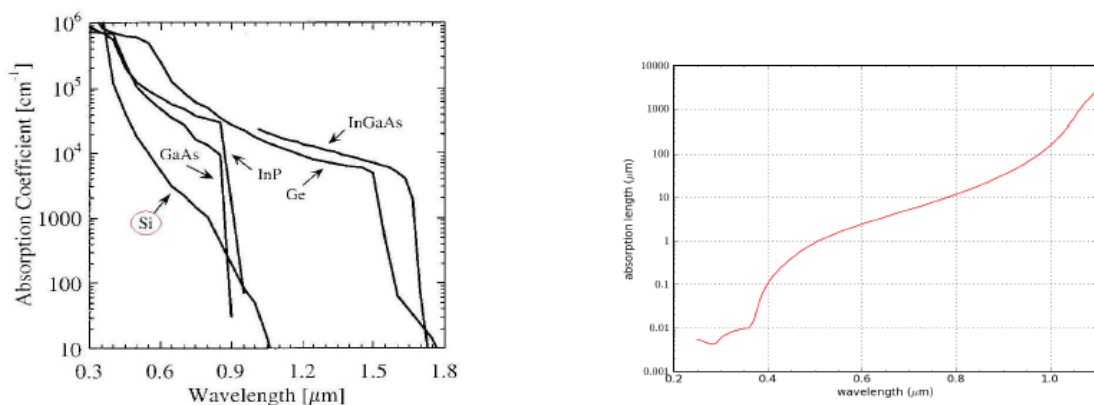


Figura 7 - Grafici del coefficiente di assorbimento di materiali semiconduttori (sinistra) e della lunghezza di assorbimento del silicio (destra).

CAPITOLO 1

Infatti il sensore Foveon, è costituito da tre giunzioni PN impilate e polarizzate inversamente da 3 differenti anodi, come viene schematizzato in figura 8. In questo modo, operando sul drogaggio e sulla profondità di collocazione delle impiantazioni droganti, è possibile ottenere le risposte spettrali delle tre bande, del rosso del verde e del blu, come in un filtro di Bayer, ma senza bisogno di alcun filtro fisico. Il vantaggio evidente di questo genere di sensore è che non ha bisogno di alcun algoritmo di demosaicking, che può provocare degli artefatti in fase di interpolazione del colore, e che invece viene utilizzato dai sensori che utilizzano i CFA. Inoltre la produzione di questo sensore non ha bisogno della deposizione dei filtri colorati ma usa dei processi standard. La mancanza di filtri colorati, aumenta potenzialmente l'efficienza quantica del dispositivo, ossia il rapporto tra la luce incidente il dispositivo e quella assorbita, poichè non c'è alcun filtro che seleziona la porzione di spettro visibile incidente. Questi processi attualmente però permettono l'impilamento di sole 3 Well, e perciò questo tipo di sensore è limitato a raccogliere l'informazione tramite solo 3 risposte spettrali, che sono decise in fase di progettazione e non possono più essere modificate. Inoltre questo tipo di sensore necessita di una elettronica più complicata, e pur non essendo pubblici i dettagli di questa elettronica, per certo dovrà essere in grado di leggere non solo gli elettroni generati, ma anche le lacune. La lettura sia di lacune, sia di elettroni, comporta l'utilizzo di Nmos e Pmos, rendendo così il dispositivo più complicato del più semplice APS (Active Pixel Sensor) e del CFA, che utilizza solamente 3 transistor Nmos.

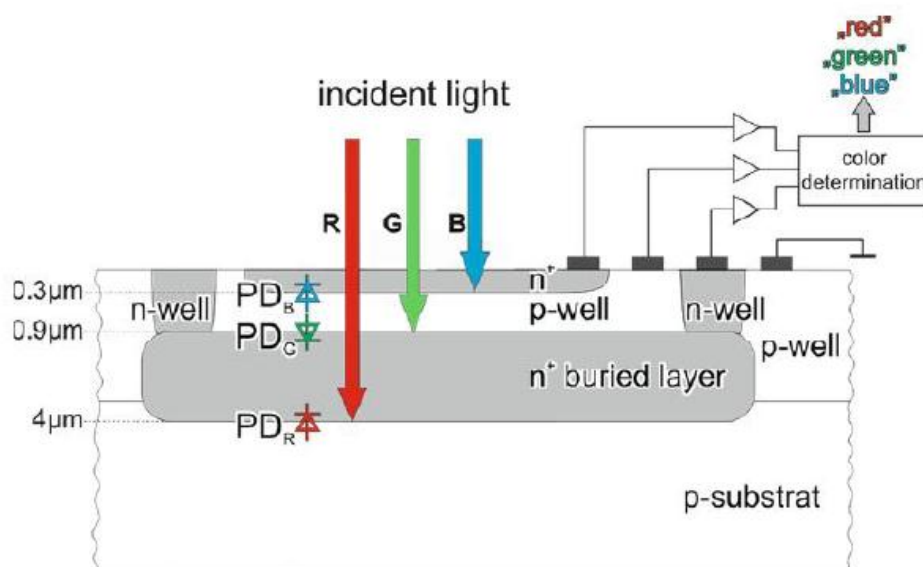


Figura 8 - Rappresentazione della sezione del dispositivo Foveon X3.

1.1.3 Sensore Filterless : TFD Transverse Field Detector

Questa Tesi tratterà di un dispositivo che condivide molti, se non tutti, i vantaggi del pixel Foveon, quali quello di non avere bisogno di alcun filtro colorato e di non aver bisogno di alcun algoritmo di demosaicking, ma che rende anche possibili ulteriori funzionalità. Di seguito viene data una descrizione qualitativa del funzionamento del dispositivo nel caso di acquisizione di sole 3 bande spettrali, descrizione che verrà approfondita nel secondo capitolo.

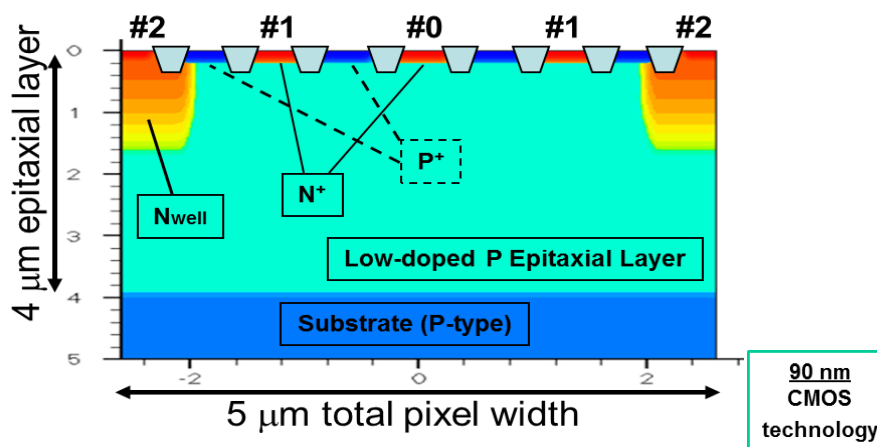


Figura 9 - Sezione del TFD simmetrico a 3 colori disegnato in tecnologia a 90 nm.

Il TFD [7] si basa sulle stesse proprietà fisiche del sensore Foveon mostrato in precedenza. Infatti anche il TFD sfrutta la particolare proporzionalità tra il coefficiente di assorbimento del silicio e la lunghezza d'onda della luce incidente. Un tipico processo tecnologico con cui si può implementare il TFD è composto da uno strato epitassiale P poco drogato, sovrapposto ad uno strato P altamente drogato. Questo tipo di struttura ha il vantaggio di essere comune in molte tecnologie e in particolare quelle di CMOS image sensors. Inoltre utilizzando uno strato epitassiale abbastanza spesso, questo dispositivo è in grado di misurare anche parte della radiazione infrarossa incidente [8].

Nella figura 9 è mostrata la cross section del dispositivo in configurazione simmetrica, in una esemplificativa tecnologia CMOS a 90 nm. In superficie sono presenti gli anodi del dispositivo, con regioni drogate n^+ (con un picco attorno a 10^{20} cm^{-3}). Questi anodi raccolgono le cariche

CAPITOLO 1

generate dalla luce assorbita nel materiale, e tramite la tensione a cui sono polarizzati, generano un campo elettrico all'interno del dispositivo. Gli anodi, sono separati tra loro da impiantazioni drogate P (rappresentate in blu) e STI (Shallow Trench Isolation); queste impiantazioni sono strutturate in modo da garantire un isolamento tra i vari anodi, che polarizzati a tensioni diverse, potrebbero innescare una corrente di punch-through tra loro. Siccome la misura è basata sulla raccolta di cariche da parte dagli anodi, il segnale è una corrente molto piccola positiva. La corrente di punch-through è così elevata da fare saturare l'intero sistema di misura, rendendo di fatto inutilizzabile il dispositivo [9] .

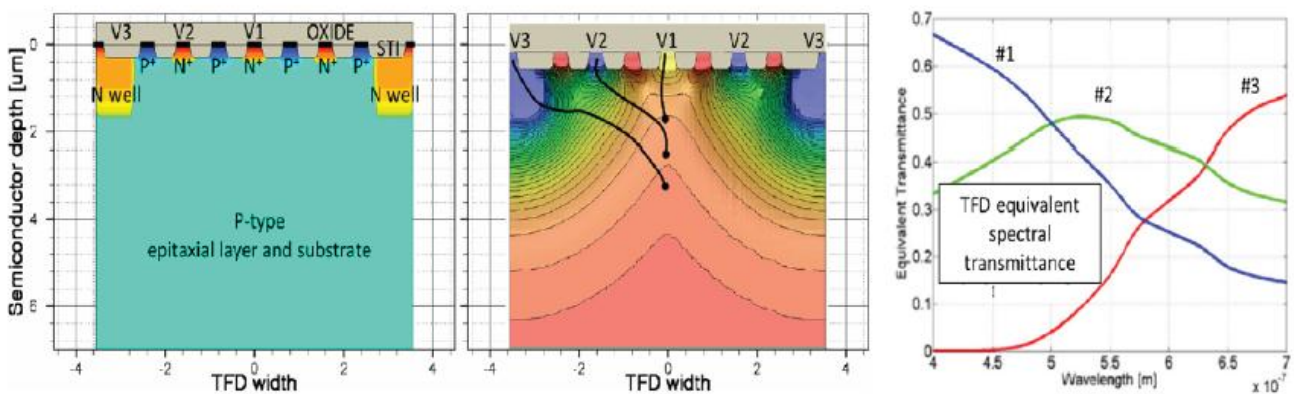


Figura 10 - (Sinistra) Sezione del TFD simmetrico a 3 colori con evidenziate le diverse impiantazioni ioniche; (centro) sezione dello stesso TFD simmetrico a 3 colori ma con evidenziate le regioni equipotenziali, le traiettorie nere sono ortogonali alle linee equipotenziali e rappresentano il campo elettrico che attira gli elettroni; (destra) sono rappresentati in uno stesso grafico il 3 filtri equivalenti delle risposte spettrali dei 3 anodi V1, V2 e V3 del dispositivo.

Gli anodi sono polarizzati a differenti tensioni positive. Lo scopo di questo tipo di polarizzazione è duplice; svuotare dalle cariche lo strato epitassiale, e generare dei campi elettrici trasversali che permettano agli anodi di raccogliere le cariche a differenti profondità, come mostrato schematizzato in figura 10. Attraverso le polarizzazioni degli anodi è possibile modificare le risposte spettrali del dispositivo, e ottenere le risposte che più si addicono al tipo di applicazione desiderata. Differentemente dai sensori mostrati in precedenza, Foveon e CFA, il TFD è in grado di variare le proprie risposte spettrali semplicemente modificando le tensioni agli anodi, ottenendo così un tuning delle risposte spettrali [10]. Il tuning delle risposte spettrali del TFD è utilizzabile in applicazioni di High Color Accuracy [11]. In questa Tesi invece si approfondirà un'altra applicazione del TFD, cioè la possibilità di misurare e utilizzare l'informazione della radiazione nel vicino infrarosso.

CAPITOLO 1

La struttura base del TFD, sopra descritta, infatti si presta agilmente ad essere modificata per aumentare il numero di anodi, e quindi di risposte spettrali, da qui nasce la possibilità di misurare anche la radiazione infrarossa con un quarto canale. Inoltre grazie alla simmetria del dispositivo rispetto all'anodo centrale, è possibile tramite opportuni accorgimenti, fare dei pixel asimmetrici, che sono essenzialmente costituiti da metà del pixel simmetrico. Un esempio di pixel asimmetrico con 4 anodi è quello della figura 26. Per isolare 2 pixel asimmetrici adiacenti viene introdotta una Pwell che impedisce alle linee del campo elettrico di un dispositivo di disturbare quelle dei dispositivi adiacenti; infatti per un corretto funzionamento del dispositivo, il campo elettrico di ogni pixel deve avere una certa geometria controllata solamente dagli anodi del proprio pixel, e non da quelli adiacenti. L'utilizzo di un pixel asimmetrico permette di migliorare il Fill Factor (rapporto tra l'area sensibile alla luce del pixel e l'area totale del pixel); inoltre introducendo un quarto anodo al pixel asimmetrico, è possibile utilizzarlo per misurare la radiazione del vicino infrarosso, a patto di utilizzare una tecnologia con uno strato epitassiale abbastanza profondo. L'innovazione è quindi quella di permettere ad un unico sensore monolitico di misurare l'informazione della luce visibile e infrarossa senza bisogno di alcun filtro o demosaicing dell'informazione dei pixel adiacenti.

Prima di entrare nel dettaglio del funzionamento e della progettazione del TFD, vengono prima descritte alcune applicazioni nelle quali può essere utilizzato questo dispositivo, ossia quelle che utilizzano simultaneamente la radiazione visibile e infrarossa.

1.2 Acquisizione simultanea radiazione visibile e infrarossa

L'acquisizione simultanea della radiazione visibile e infrarossa può essere sfruttata in molte applicazioni che vengono discusse in questo capitolo; prima però vengono spiegate più in dettaglio alcune proprietà fisiche del silicio, inerenti l'acquisizione della radiazione infrarossa, e fondamentale alla comprensione dei limiti di funzionamento del dispositivo.

Una interessante proprietà della radiazione infrarossa, a lunghezze d'onda molto vicine a quelle visibili, è quella che in una scena, il contenuto dell'informazione nella radiazione nel vicino infrarosso è molto simile all'informazione contenuta nello spettro visibile; questa proprietà non è condivisa dalle radiazioni con lunghezze d'onda molto distanti da quelle visibili, come ad

CAPITOLO 1

esempio le radiazioni gamma, o le radiazioni infrarosse a lunghezze d'onda molto maggiori di quelle visibili. Questa caratteristica peculiare delle radiazioni nel vicino infrarosso, possono quindi essere sfruttate per 2 scopi:

- Migliorare la resa qualitativa di un'immagine, integrando l'informazione infrarossa.
- Aggiungere nuove funzionalità al sistema di acquisizione di immagini.

La radiazione luminosa percepibile dell'occhio umano spazia a seconda dell'individuo nella regione di spettro con lunghezze d'onda che variano da circa i 400 nm, che corrisponde al blu, fino alla lunghezza d'onda di circa 700 nm, corrispettivi del rosso. Il silicio si presta bene a tutte le applicazioni ottiche perché assorbe efficientemente tutta la porzione di spettro visibile come mostrato in figura 11. Come si può vedere dal grafico, anche se con un coefficiente di assorbimento via via decrescente, il silicio è in grado di assorbire radiazioni fino alla lunghezza d'onda di 1100 nm. Lo spettro infrarosso è convenzionalmente definito come quella porzione di spettro che parte dalle lunghezze d'onda di 750 nm, dove finisce la radiazione visibile, e si estende fino ai 300 μm . Il silicio, a causa della diminuzione del suo coefficiente di assorbimento all'aumentare della lunghezza d'onda, non è in grado di raccogliere tutto lo spettro della radiazione infrarossa, e si limita ad arrivare a 1100 nm, e infatti per convenzione la porzione di spettro che è in grado di assorbire si chiama vicino infrarosso, da qui in poi NIR, (Near InfraRed).

Al diminuire del coefficiente di assorbimento, è necessario un maggiore spessore del materiale attraversato dalla luce perché questa venga assorbita, e quindi una maggiore profondità dell'epistrato del dispositivo; questa relazione viene spiegata in dettaglio durante la spiegazione del principio di funzionamento del dispositivo nel secondo capitolo, poichè questa dipendenza sta alla base del funzionamento del dispositivo.

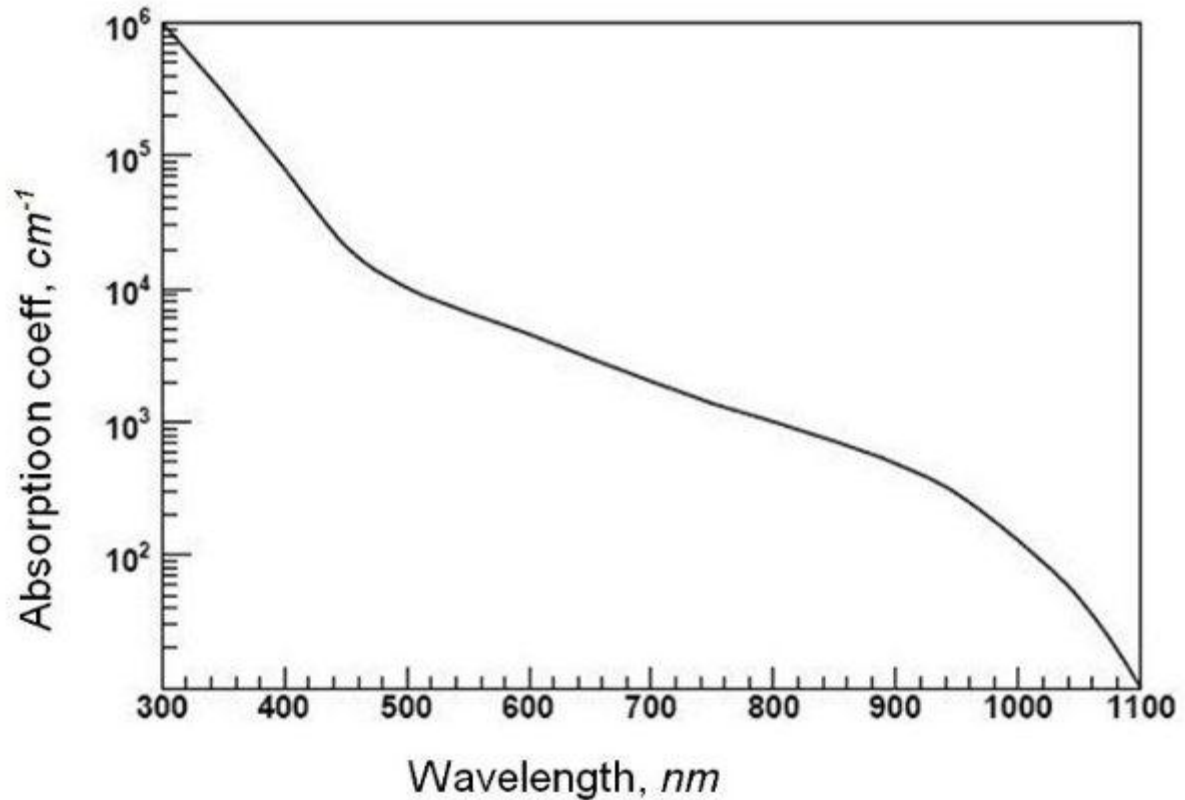


Figura 11 - Grafico del coefficiente di assorbimento del silicio.

1.3 Applicazioni dell'informazione NIR

In seguito vengono esposte alcune delle possibili applicazioni dell'acquisizione della radiazione infrarossa nel campo della fotografia digitale; successivamente vengono descritti i metodi odierni utilizzati per misurare la radiazione NIR e i vantaggi e gli svantaggi di questi rispetto al TFD.

1.3.1 HDR

L'informazione aggiuntiva fornita dalla radiazione NIR può essere sfruttata per migliorare il Dynamic Range dell'immagine, da ora in poi DR, cioè il rapporto tra il massimo e il minimo segnale misurabile. Il DR è molto importante nelle macchine fotografiche, ad esempio in un

CAPITOLO 1

panorama esterno soleggiato, l'occhio umano raggiunge un DR di 10^9 , mentre una macchina fotografica digitale professionale, che utilizza 14 bit per canale, può raggiungere un DR di appena 10^4 . Una immagine con un alto range dinamico permette di ottenere contemporaneamente maggiori dettagli nelle zone più luminose e più buie di una scena, aumentando così la quantità globale di informazioni ottenibili da una immagine. Esistono diverse tecniche che possono essere utilizzate per migliorare il DR e ottenere così un High Dynamic Range (HDR). Una è quella di acquisire ripetutamente la stessa immagine variando il tempo di esposizione.

Senza l'utilizzo dell'informazione infrarossa, uno dei procedimenti utilizzato attualmente per migliorare il DR è quello degli scatti multipli; ogni acquisizione successiva della stessa scena è fatta variando il tempo di esposizione, in modo da potere così ottenere più foto a diverse luminosità (figura 12). Il numero minimo di scatti necessari per migliorare il DR è 3. Utilizzando degli algoritmi di interpolazione è possibile ricostruire una singola immagine inglobando i dettagli di ogni singolo scatto [12] (figura 13). Un problema di questa tecnica è che ha bisogno di numerosi scatti, e quindi ha bisogno di una scena statica, il che limita molto la sua applicabilità; inoltre ha lo svantaggio di aver bisogno di algoritmi di post processing molto complicati che non si adattano a tutti i tipi di scene. Questi algoritmi devono evitare di produrre un'immagine finale con aloni in zone con forti variazioni di luminosità o di ottenere dei colori così saturi da sembrare poco realistici.

CAPITOLO 1



Figura 12 - 6 scatti successivi della stessa scena al crescere del tempo di esposizione.

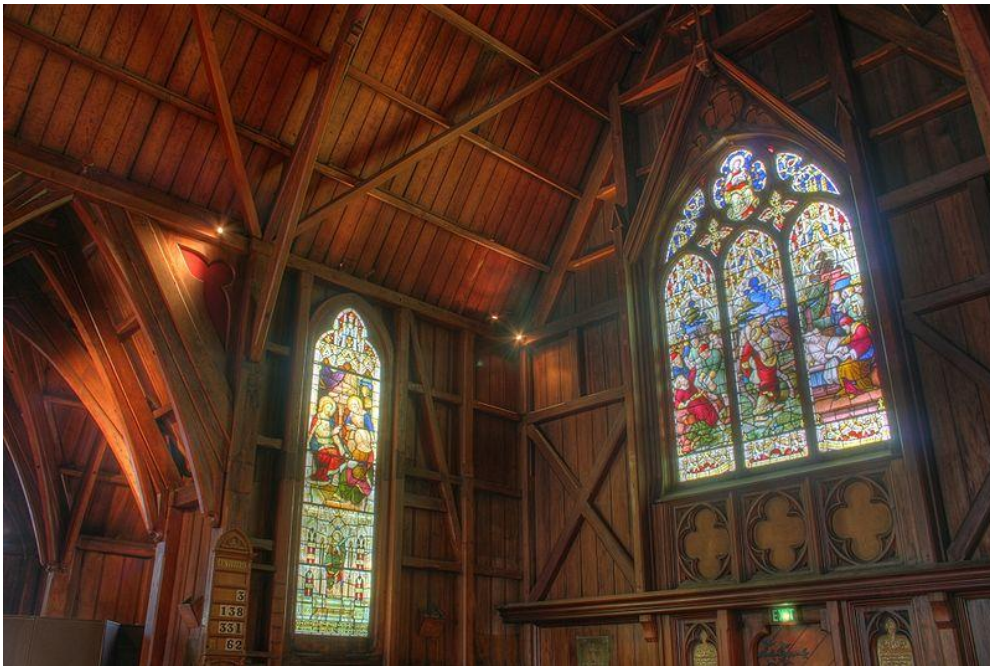


Figura 13 - Combinazione dei sei scatti precedenti tramite algoritmi di post processing per ottenere un'immagine ad alto dynamic range.

Un'altra tecnica commerciale per ottenere un alto Dynamic Range è quello sviluppato da Fujifilm nei sensori **Super CCD SR** sensor [13] , schematizzati in figura 14. Questi sensori hanno la caratteristica di avere 2 diversi fotodiodi in ogni fotosito che condividono le stesse microlenti e filtri. Questi 2 fotodiodi sono nominati 'S' ed 'R'. I fotodiodi 'S' sono più grandi di quelli 'R' e hanno una sensibilità comparabile a quelli convenzionali delle macchine fotografiche

CAPITOLO 1

CCD; i fotodiodi 'R' sono più piccoli in modo da avere una sensibilità minore e ottenere dei dettagli maggiori in caso di saturazione del rispettivo fotodiodo 'S'. Combinando l'informazione misurata dai 2 diversi pixel 'R' ed 'S' è possibile migliorare il Dynamic Range riproducendo dei dettagli che verrebbero persi a causa di una sovraesposizione. Questa tecnica rispetto a quella degli scatti multipli ha il vantaggio di non aver bisogno di una scena statica, oltre che a sfruttare degli algoritmi di post processing più semplici.

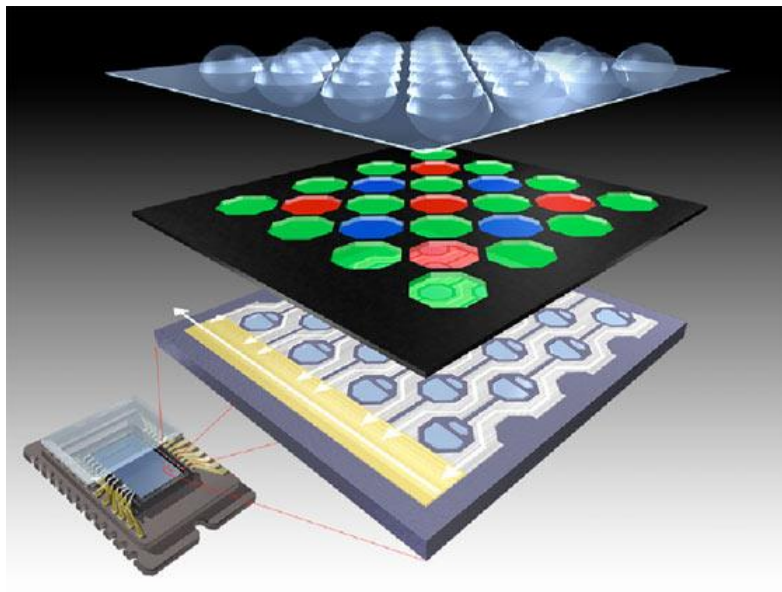


Figura 14 - Sezione del SuperCCD SR; sono rappresentati partendo dall'alto, le microlenti, il filtro di bayer, e la superficie del chip, dove sono evidenziati i fotodiodi 'S' ed 'R'.

Un'evoluzione ulteriore dei Super CCD SR sensor, sempre sviluppati da Fujifilm, sono i **Super CCD EXR** Sensor. Questi sensori condividono i pixel 'R' dei Super CCD SR spiegati precedentemente e sfruttano un nuovo layout di disposizione dei pixel mostrato in figura 15.

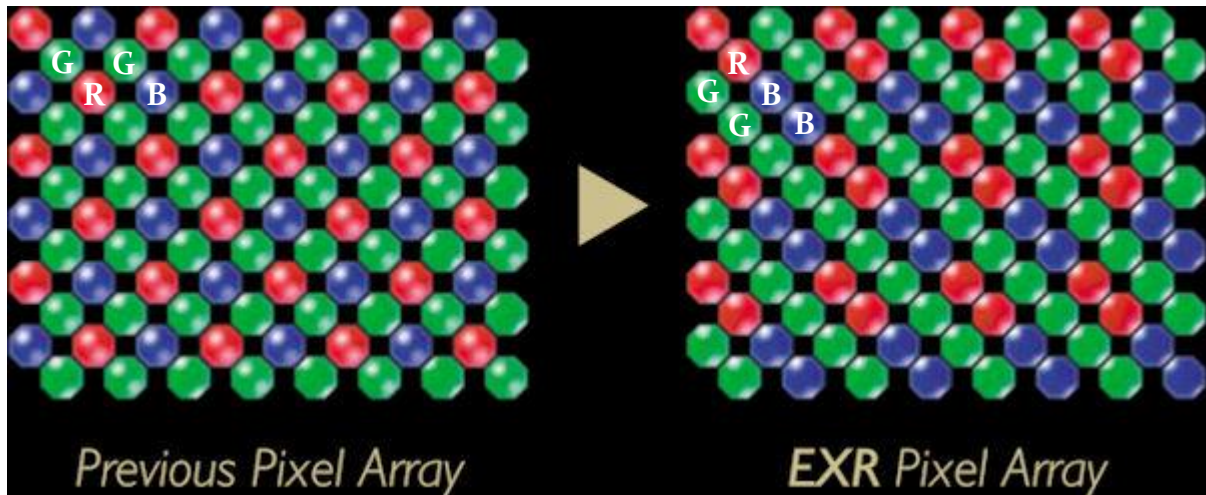


Figura 15 - Nuovo layout dei filtri colorati con la disposizione EXR

La nuova disposizione dei pixel alterna delle diagonali di pixel verdi a diagonali di coppie di pixel rossi e blu, ciò permette un miglioramento del pixel binning. Il pixel binning è una tecnica che permette di combinare l'informazione di pixel adiacenti in un unico pixel più grande, migliorando la sensibilità ma riducendo la risoluzione. Il problema con il precedente Pixel Array, era che utilizzando la tecnica di pixel binning, ogni pixel era adiacente a pixel di colore diverso, e la combinazione dell'informazione di pixel con differenti colori poteva provocare degli artefatti in zone della scena molto dettagliate o ad alto contrasto. Con il nuovo layout è possibile operare il pixel binning tra pixel dello stesso colore, evitando questi inconvenienti. Il risultato è simile a quello delle fotografie ottenute con più scatti, ma utilizzando uno scatto singolo. Inoltre questo particolare layout permette all'operatore di scegliere se utilizzare il pixel binning per aumentare la sensibilità, o di sfruttare la lettura a "metà esposizione" dei pixel "R" ed "S" per aumentare il DR.

Un altro metodo alternativo per migliorare il Dynamic Range è quello di sfruttare l'informazione della radiazione NIR [14], per trasferire il maggiore contrasto che si ottiene nell'acquisizione dell'informazione NIR, nell'immagine a colori. Quando un'immagine ha zone troppo chiare o scure, oppure poco sature, avviene una perdita dei dettagli dell'immagine; per questo motivo vengono create due maschere della stessa immagine, delle quali vengono valutate la luminosità e la saturazione del colore, in modo da capire quali saranno le zone da migliorare.

CAPITOLO 1

Tramite un'acquisizione simultanea della radiazione infrarossa e visibile, è possibile ottenere 2 informazioni distinte, quella relativa ai canali RGB, e quella relativa al canale NIR. L'informazione RGB è ottenuta dalla misura tramite 3 diversi canali, appunto quello rosso, verde e blu, ed è rappresentabile tramite una grandezza vettoriale a 3 dimensioni; l'informazione acquisita tramite il singolo canale Nir è invece rappresentabile con una grandezza monodimensionale. La grandezza vettoriale a 3 dimensioni RGB, tramite apposite trasformazioni di spazio colore, può essere scomposta nello spazio $L^*a^*b^*$. Queste trasformazioni e la spiegazione degli spazi colore, sono mostrati in dettaglio nel capitolo 2, nel paragrafo 2.3 "criteri di ottimizzazione". Lo spazio $L^*a^*b^*$, fornisce informazioni relative alla cromaticità, tramite le coordinate a^* e b^* , e la luminanza L^* . La cromaticità è la specificazione oggettiva della qualità del colore indifferentemente dalla sua luminanza, mentre la luminanza è una grandezza fotometrica che esprime la proiezione dell'intensità luminosa della sorgente luminosa su una superficie. L'informazione dello spettro infrarosso, porta con sé l'informazione della sola luminanza, e quindi è un'immagine priva di cromaticità, ma come è visibile in figura 16 è più dettagliata di quella visibile.



Figura 16 – (Sinistra) Rappresentazione della scena tramite la sola informazione RGB proveniente dallo spettro visibile. (Destra) Rappresentazione della scena tramite la sola informazione misurata dallo spettro NIR [14].

Per incorporare i dettagli dell'immagine infrarossa, le 2 diverse luminanze, quella dell'immagine visibile e quella dell'immagine NIR, sono mediate per ottenere una luminanza complessiva; il

CAPITOLO 1

tipo di media che si utilizza per ottenere questa luminanza complessiva, dipende dal tipo di algoritmo utilizzato. La luminanza complessiva, derivata dall'informazione visibile e Nir, viene associata alla cromaticità dell'acquisizione ottenuta dall'informazione RGB. Mediante la cromaticità della acquisizione RGB e la nuova luminanza complessiva si ottiene una nuova coordinata $L^*a^*b^*$, e dallo spazio $L^*a^*b^*$ è possibile operare una trasformazione dello spazio colore e ritornare a qualsiasi spazio desiderato, come ad esempio lo spazio RGB originario o lo spazio standard CIE XYZ. L'immagine ottenuta sfruttando la luminanza dell'immagine Nir ottiene così un maggior contrasto e una maggiore ricchezza di particolari, come si può vedere in figura 17.

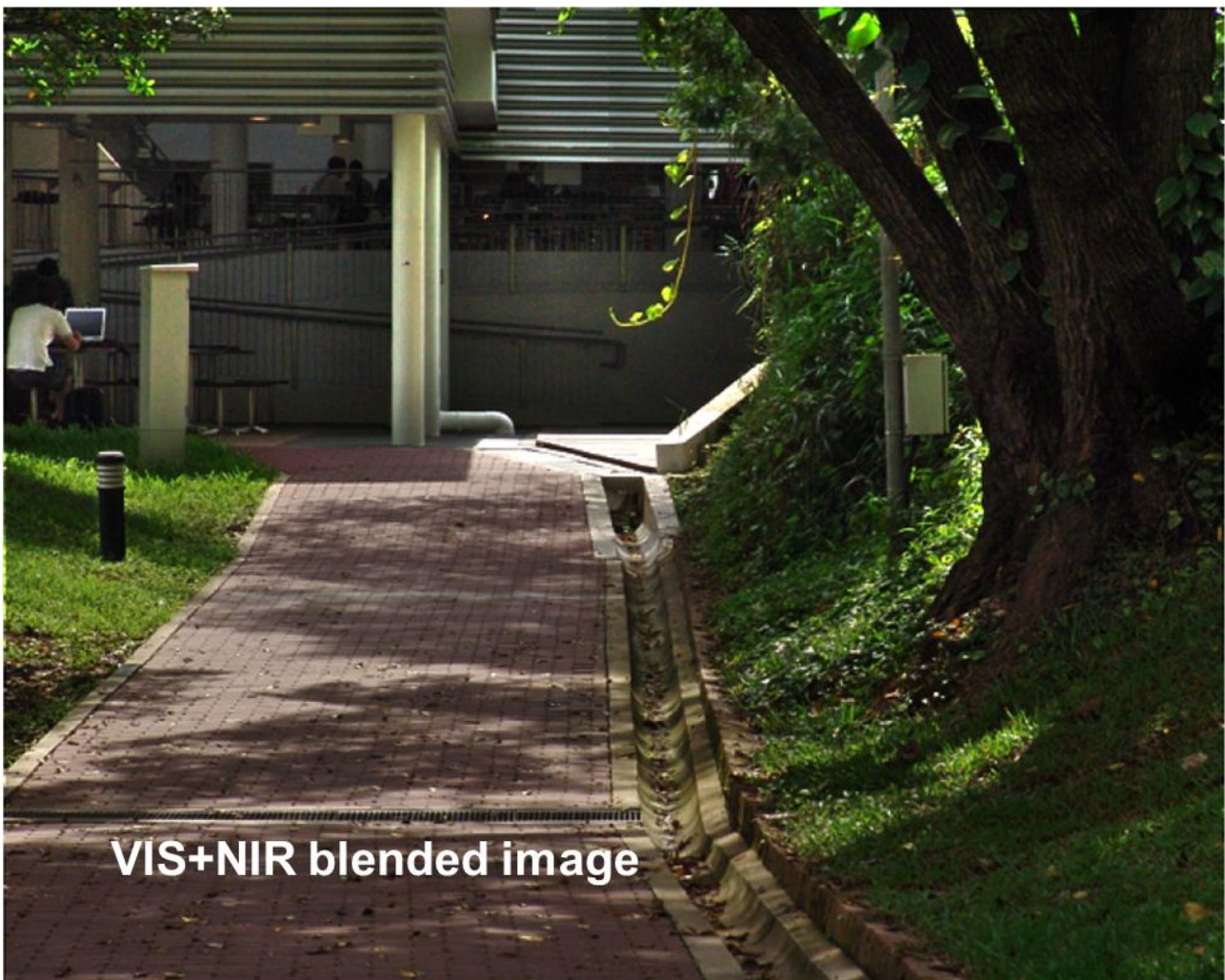


Figura 17 - Immagine ottenuta tramite la composizione dell'immagine infrarossa e visibile della figura 16 [14].

1.3.2 Color Image Dehazing

Nelle fotografie di panorami gli oggetti distanti appaiono spesso annebbiati da una foschia blu, questa degradazione dei dettagli è causata dalla foschia atmosferica. Per migliorare i dettagli compromessi dalla foschia, e ottenere così un maggiore contrasto dell'immagine e un maggior numero di dettagli, è possibile ridurre l'effetto della foschia tramite il dehazing. Questo miglioramento è possibile tramite la combinazione della stessa immagine acquisita nella radiazione visibile e nel NIR [15]. L'immagine è degradata dalle particelle in aria che sparpagliano la luce, l'intensità della luce sparpagliata è proporzionale a due variabili: la lunghezza d'onda della luce e la dimensione delle particelle nell'atmosfera. La foschia si forma quando le particelle sospese nell'atmosfera hanno una dimensione minore di un decimo della lunghezza d'onda, λ . L'intensità della luce sparpagliata E_s è proporzionale alla luce incidente E_0 tramite la legge di Rayleigh:

$$E_s \propto \frac{E_0}{\lambda^4}$$

L'intensità della luce sparpagliata è inversamente proporzionale alla potenza quarta della lunghezza d'onda incidente λ . Il cielo e la foschia appaiono blu perchè le lunghezze d'onda nel blu sono le più corte, e quindi le più sparpagliate.

Una conseguenza della legge di Rayleigh è che l'intensità luminosa sparpagliata ad alte lunghezze d'onda è minore, ed è per questo motivo che le immagini nel NIR sono più nitide e soffrono meno del fenomeno di hazing. In figura 18 sono mostrate due acquisizioni nel visibile e nel NIR, che vengono composte per ottenere maggiori dettagli.



Figura 18 - (In alto) E' rappresentata la scena acquisita solamente tramite le tre risposte spettrali nello spettro visibile. (In centro) E' rappresentata l'immagine tramite l'acquisizione della sola informazione infrarossa. (In basso) E' rappresentata la combinazione delle due acquisizioni tramite algoritmi di post processing [14].

1.3.3 Background/foreground segmentation

Un'altra possibile applicazione che utilizza l'informazione dello spettro NIR è quella di migliorare la segmentazione delle immagini; la segmentazione delle immagini è un'elaborazione digitale delle immagini che permette di partizionare un'immagine in regioni significative; lo scopo è quello di semplificare la rappresentazione delle immagini in qualcosa di facile da analizzare. Gli utilizzi della segmentazione dell'immagine possono essere applicati in svariati campi, come ad esempio nel medical imaging, per le localizzazioni satellitari o per le riprese televisive e cinematografiche. Attualmente gli algoritmi di segmentazione delle immagini isolano

CAPITOLO 1

i contorni di un materiale tramite il colore e le ombre, e si confondono quando in uno stesso oggetto c'è una variazione netta di colore dovuta all'illuminazione o alla geometria dell'oggetto. Attraverso l'informazione ottenuta dal canale NIR, è possibile migliorare l'identificazione dei contorni di un'immagine grazie a certe proprietà della radiazione infrarossa. Infatti la radiazione NIR non è influenzata dalla variazione di colore dello stesso materiale, l'intensità della radiazione NIR dipende solo dal tipo di materiale e dalla illuminazione [16], quindi è possibile operare una segmentazione indipendente dalle ombre e dai colori, ma dipendente solo dal materiale come mostrato in figura 19.



Figura 19 - Nelle 2 immagini a sinistra i contorni, in verde, sono stati identificati attraverso la sola informazione dello spettro visibile. (a destra) I contorni sono stati identificati tramite l'utilizzo dell'informazione infrarossa e visibile.

E' evidente come la qualità della segmentazione ottenuta tramite l'informazione infrarossa sia migliore rispetto a quelle ottenute tramite la sola informazione visibile; infatti in figura 19 è apprezzabile come le parti in ombra di una stessa superficie, utilizzando una rivelazione

infrarossa, non siano confuse con una differente superficie; inoltre anche le variazioni nette di cromaticità di uno stesso oggetto non vengono interpretate con partizioni differenti, permettendo una segmentazione migliore rispetto a quella ottenibile senza informazione infrarossa.

1.3.4 Luce strutturata e identificazione della superficie degli oggetti

La luce strutturata può essere utilizzata per riconoscere le superfici degli oggetti tramite la misura della distanza e della profondità di questi [17]. La luce strutturata è una tecnica di rilevamento tridimensionale che consiste nel proiettare un pattern noto su una scena, tipicamente righe verticali o orizzontali; secondo questa tecnica la luce viene proiettata da uno o più punti di vista sulla scena da identificare come schematizzato in figura 20; la corrispondenza tra due punti proiettati sulla scena può essere trovato tramite diversi algoritmi, così da recuperare le informazioni della superficie della scena. La ricostruzione della superficie degli oggetti può essere utilizzata in molti campi, come ad esempio il controllo qualità industriale, il riconoscimento degli oggetti o la costruzione di mappe tridimensionali; in figura 20 ad esempio questa tecnica è utilizzata per separare il volto dallo sfondo, che può ad esempio rivelarsi utile durante le video conferenze. La schematizzazione mostrata in figura 20, mostra un proiettore di luce strutturata che proietta sulla scena un pattern di righe verticali; il rilevatore acquisisce l'immagine della luce strutturata deformata dalla superficie della scena, e tramite un'elaborazione digitale è possibile risalire alle informazioni relative alla geometria della scena.

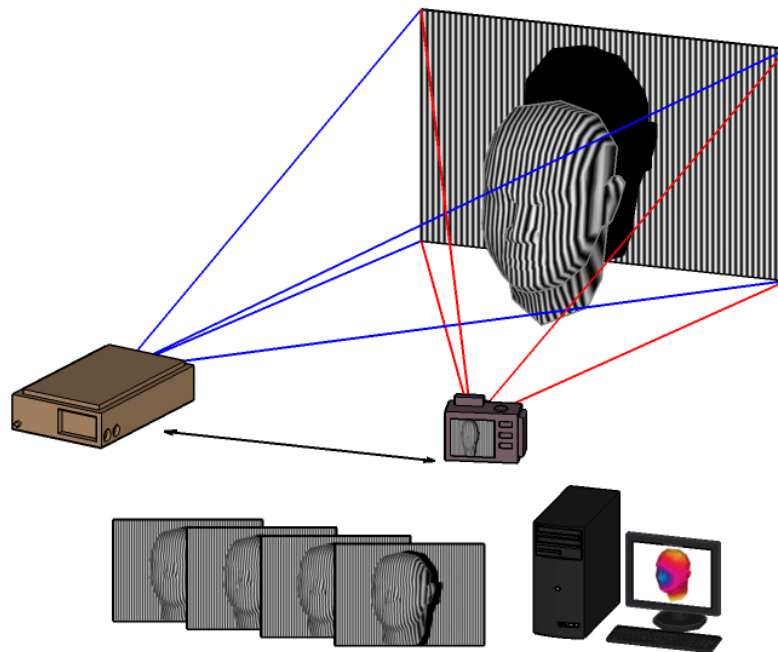


Figura 20 - Sistema di proiezione di luce strutturata su una scena, e acquisizione di essa.

Attualmente, una possibile tecnica di recupero dell'informazione della superficie degli oggetti, è quella ottenuta tramite l'utilizzo dell'informazione di due o più fotocamere poste a diversi punti di vista; le immagini acquisite dalle diverse fotocamere vengono analizzate per individuarne le corrispondenze necessarie alla triangolazione delle posizioni tridimensionali degli oggetti. Questa tecnica è molto simile a quella degli occhi umani, ma mostra molti difetti nel trovare le corrispondenze tra le diverse acquisizioni. La tecnica che utilizza la luce strutturata, sostituisce una delle due camere con un proiettore di luce strutturata infrarossa e ottiene risultati molto più soddisfacenti [18]. I pattern possibili sono molteplici, ed ognuno ha degli appositi algoritmi per recuperare l'informazione ottenuta dalla deformazione della luce proiettata sulla scena. La scena e il pattern sovrapposto vengono acquisiti da appositi rivelatori, e tramite la deformazione che il pattern presenta sulla superficie degli oggetti, è possibile misurare la distanza di questi oltre che la loro geometria; ad esempio utilizzando un pattern composto da linee parallele come in figura 20, dopo l'acquisizione dell'immagine, è possibile calcolare la distanza degli oggetti dalla sorgente di luce strutturata, misurando la distanza tra le linee sovrapposte alla scena; una distanza maggiore tra le linee corrisponderà ad una maggiore distanza della scena dal proiettore, e la loro deformazione corrisponderà alla geometria degli oggetti nella scena; secondo queste

relazioni, gli algoritmi possono recuperare l'informazione riguardo alla superficie e la distanza degli oggetti [18].

La luce strutturata, per non disturbare l'osservatore, deve essere emessa da un proiettore ad infrarossi in modo che lo spettatore non riesca a percepirla; per poter recuperare l'informazione sia della superficie degli oggetti, tramite il pattern infrarosso, sia del loro colore, è necessario utilizzare dispositivi capaci di misurare entrambe le radiazioni, e descritti nel prossimo paragrafo.

In seguito verranno proposti alcuni dei metodi odierni per l'acquisizione simultanea dello spettro visibile e NIR, facendo una distinzione tra le tecniche che utilizzano particolari filtraggi, e tra le tecniche che sfruttano le proprietà di assorbimento del silicio, come il TFD.

1.4 Metodi di acquisizione dell'informazione infrarossa

1.4.1 Acquisizione tramite modifiche al CFA o tramite particolari filtraggi.

I sistemi di digital imaging indirizzati al mercato consumer utilizzano comunemente un filtro che elimina la radiazione infrarossa prima che sia trasmessa al sensore, chiamato "hot mirror" e mostrato nella schematizzazione in figura 21; questo filtro è necessario nei sistemi che utilizzano tecniche di acquisizione come i CFA (Colored Filter Array); infatti, tipicamente i filtri colorati dei CFA, da soli non riescono a tagliare la radiazione IR come è mostrato nelle risposte spettrali dei filtri in figura 21. L'acquisizione da parte dei canali RGB della radiazione infrarossa non è rilevante e viene eliminata, poiché non da alcuna informazione relativa alla cromaticità della scena.

Perciò per acquisire la radiazione NIR è necessario omettere il filtro IR, ma così facendo le risposte del CFA vengono modificate; è così necessario studiare soluzioni alternative che vengono discusse in seguito.

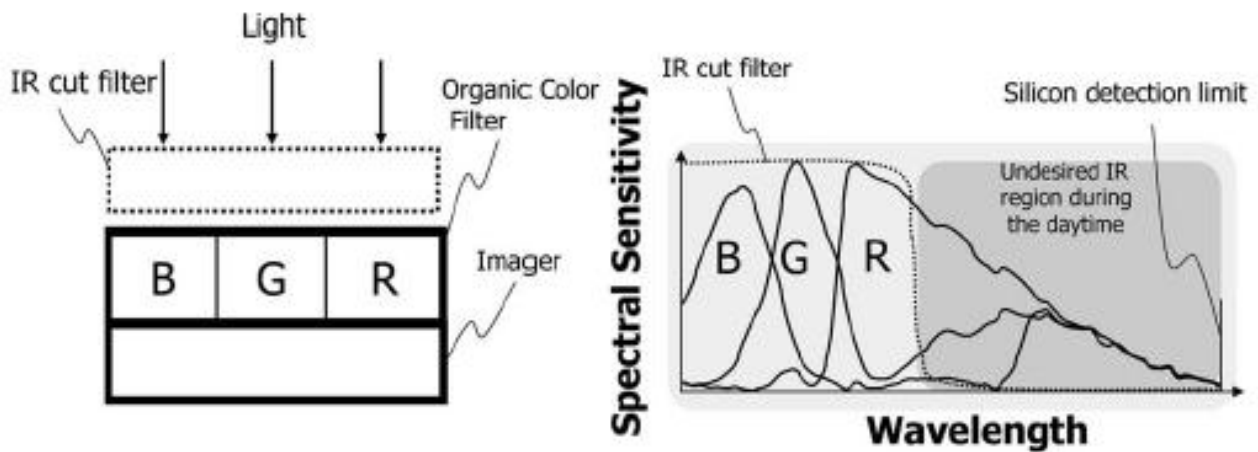


Figura 21 - (Sinistra) Sezione di un tipico sensore di digital imaging, con rappresentati il filtro infrarosso, i filtri colorati RGB ed il sensore. (Destra) Sono rappresentate le trasmittanze spettrali dei 3 filtri colorati RGB, e del filtro infrarosso.

1.4.1.1 Colored Filter Array modificato

Omettendo il filtro infrarosso è necessario modificare il CFA per includere la radiazione IR nella misura. Gli approcci possibili sono molteplici, ad esempio è possibile utilizzare un quarto canale senza alcun filtraggio ottico che raccoglie tutta la radiazione assorbita dal silicio; mentre viene mantenuto il classico filtraggio RGB, includente il filtro IR, negli altri tre canali [19]; in questo caso il quarto canale è detto bianco e il classico filtro RGB (Red, Green, Blue), viene detto WRGB (White, Red, Green, Blue). Il quarto canale, con la sua risposta spettrale sensibile alla radiazione infrarossa, viene sfruttato nelle applicazioni discusse precedentemente, come ad esempio il miglioramento del DR.

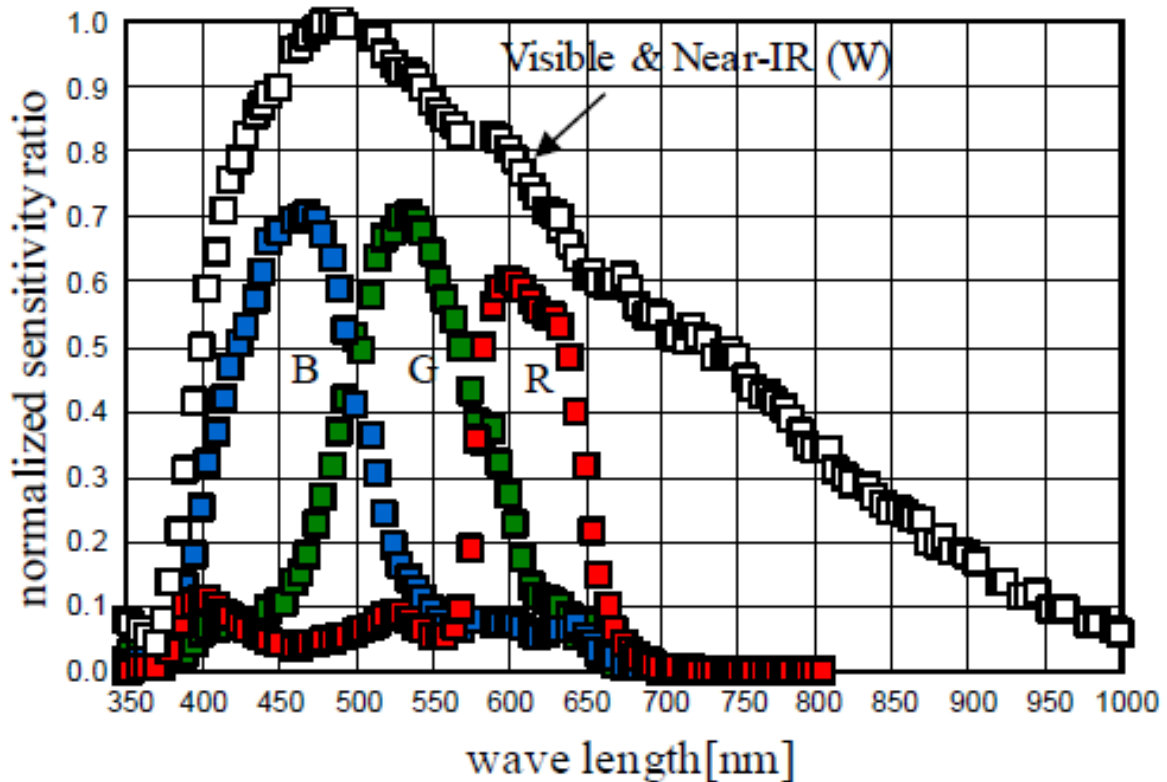


Figura 22 - Sensibilità relativa dei 3 canali RGB e del canale W, nel quale è omissa ogni filtraggio ottico.

Il canale “bianco” introduce una quarta risposta spettrale del dispositivo, mostrata in figura 22.; il quarto canale è sprovvisto di ogni tipo di filtraggio e permette di ottenere una quarta risposta spettrale che comprende la radiazione NIR. Questo dispositivo oltre ad avere un maggiore DR, permette anche di acquisire immagini a larga banda spettrale, e in particolare è possibile fare acquisizioni notturne tramite il canale NIR.

Questa tecnologia è schematizzata in figura 23, ed utilizza dei filtri RGB standard, solamente a questi viene sovrapposto un ulteriore filtro che permette di filtrare completamente la radiazione infrarossa, siccome non è presente un hot mirror nell’ottica del dispositivo; lo svantaggio di questi spessori aggiuntivi, necessari a filtrare la radiazione IR, è di richiedere degli step di processo non standard; attualmente questi processi tecnologici sono poco controllati e ripetibili, e questo limite tecnologico rende perciò questa tecnologia non impiegabile su larga scala.

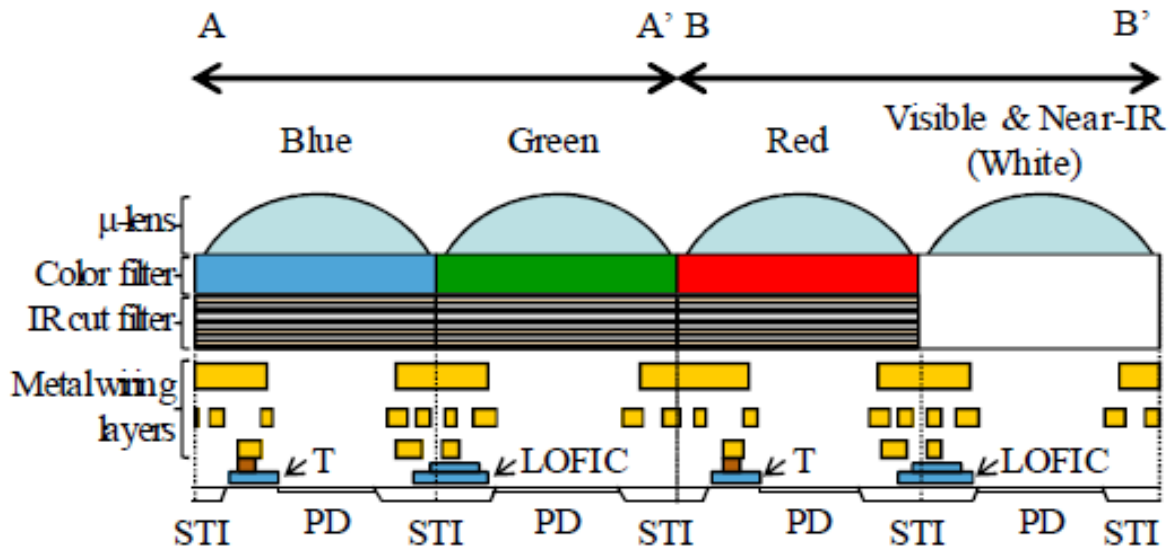


Figura 23 - Sezione trasversale del dispositivo WRGB. Sono mostrate le micro-lenti, i filtri colorati per i canali RGB, il filtro infrarosso integrato, e i piani di metallo.

Un'altra tecnica di acquisizione dell'immagine NIR discussa in letteratura [20], è quella di rimuovere il filtro infrarosso dall'ottica del sistema, e utilizzare un quarto canale con un cristallo fotonico che è in grado di trasmettere la sola radiazione infrarossa; il cristallo fotonico è una nanostruttura che può presentare una banda proibita per la luce analoga a quella dei semiconduttori, tramite una modulazione periodica del suo indice di rifrazione, e in questo modo può funzionare da filtro per la luce incidente. In questa configurazione il CFA viene modificato introducendo anziché un canale "bianco", come nella tecnica precedente, un canale IR dove è presente il cristallo fotonico che filtra la radiazione visibile.

Per compensare la mancanza del filtro infrarosso nei canali RGB e correggere gli errori introdotti, si sottrae il segnale IR dai canali RGB come viene schematizzato in figura 24.

Questa tecnologia condivide i vantaggi del metodo spiegato precedentemente, perché permette di ottenere l'informazione aggiuntiva del canale infrarosso e sfruttarla in diverse applicazioni; inoltre sfrutta tecnologie standard per la realizzazione dei pixel e dei filtri RGB; lo svantaggio è quello di dover utilizzare un cristallo fotonico per realizzare un filtro che taglia la radiazione visibile, e l'implementazione di questo cristallo è un'operazione difficilmente impiegabile in tutte le tecnologie, e non è un processo ripetibile.

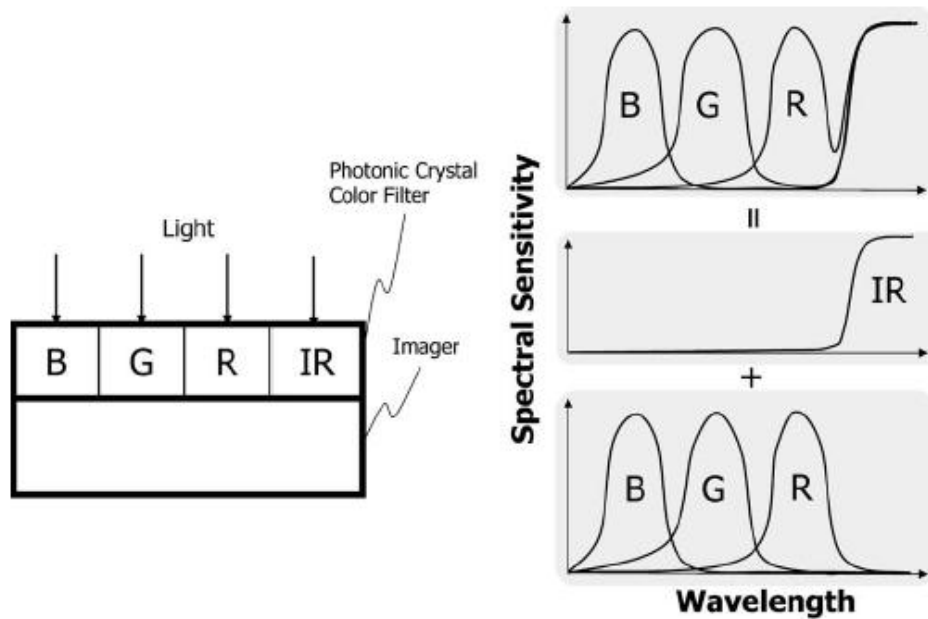


Figura 24 - (Destra) Sezione trasversale del dispositivo, si nota la mancanza del filtro IR e la presenza di un Photonic Crystal. (Sinistra in alto) Sono rappresentate le risposte spettrali dei tre canali RGB. (Sinistra in centro) Risposta spettrale del solo canale IR. (Sinistra in basso) Sottrazione della risposta del canale IR alla risposta spettrale dei canali RGB.

Un'altra possibile tecnica di acquisizione utilizzata è quella di non modificare i sensori, ma sfruttare quelli esistenti di una comune fotocamera con sensori CFA [21]; la tecnica è quella di fare 2 acquisizioni successive; una acquisizione viene fatta con il filtro infrarosso, mentre la successiva viene fatta dopo aver tolto meccanicamente il filtro infrarosso. Questa è una soluzione poco pratica, che permette di fotografare solamente scene immobili e con una scomoda azione meccanica. Per acquisire l'informazione infrarossa, viene tenuta immobile la telecamera, e viene meccanicamente estratto il filtro infrarosso dalla fotocamera sostituendolo con un vetro che non filtra alcuna lunghezza d'onda nel visibile e nell'infrarosso. Questo metodo è utile per indagare i vantaggi dell'informazione infrarossa nella qualità di una foto, ma non è praticabile, a causa della necessità di una scena statica e di un supporto fisso per la fotocamera, necessario mentre si sostituiscono i filtri.

1.4.1.2 *Acquisizione mediante filtro separa colore*

CAPITOLO 1

Un'altra soluzione per acquisire la radiazione IR in maniera più facile, e in condizioni più semplici delle precedenti, è quella di utilizzare due fotocamere e un filtro che separa la luce visibile e infrarossa su ciascuna fotocamera [14]; questa tecnica viene schematizzata in figura 25.



Figura 25 - E' rappresentato un sistema di acquisizione tramite un filtro separa colore, composta dai 2 sistemi di acquisizione, Camera V ed N, e dal filtro separa colore.

La fotocamera V, riceve la luce visibile e la elabora come di consueto, mentre la fotocamera N, priva del filtro infrarosso, riceve solamente la luce NIR. L'unione di entrambe le informazioni, nel visibile e nel vicino infrarosso, come discusso in precedenza, permettono di migliorare la qualità delle immagini.

Questo genere di acquisizione è stata utilizzata per ottenere un quarto canale, e l'informazione infrarossa è utilizzata per migliorare la qualità dell'immagine e in particolar modo per aumentare il DR. L'evidente svantaggio è quello di dover utilizzare due fotocamere distinte di uguale risoluzione ed ottica; inoltre serve un perfetto allineamento tra il filtro separa colore e i sensori, per fare corrispondere correttamente i pixel delle due matrici. Questo metodo di acquisizione ancora non si presta ad essere applicato alle fotocamere del mondo consumer, a causa dell'eccessivo ingombro e del costo di avere 2 ottiche e 2 sensori, nonostante riesca ad ottenere un miglioramento del DR.

1.4.2 Tecniche che sfruttano l'assorbimento del silicio

1.4.2.1 *Sensore di immagine con VIPS (Vertically Integrated Photodiode Structure)*

Un'altra soluzione possibile per acquisire l'informazione NIR insieme a quella visibile, utilizzando i consueti CFA senza il filtro infrarosso, è quella di utilizzare un sensore che aggiunge una impiantazione ionica molto profonda sottostante ai convenzionali sensori CMOS [22]; un fotodiodo viene impiantato al di sotto del pixel in modo da raccogliere la radiazione NIR come è mostrato nella sezione in figura 26.

Per questa tecnologia vengono utilizzati processi molto particolari che permettono di impiantare gli ioni droganti nello stato epitassiale del fotodiodo fino ad una profondità di circa 3 μm , mentre le impiantazioni di tecnologie standard arrivano fino ad una profondità di 0.5 μm ; per impiantare gli ioni così in profondità vengono utilizzati ioni a alta energia, a circa 3MeV. La differente profondità di impiantazione permette di isolare i fotodiodi dei CFA, da quello in profondità come mostrato nella figura 26; in questo modo le zone di raccolta possono essere svuotate separatamente e in maniera distinta. Con questa tecnologia è stata prodotto un chip completo di elettronica di lettura con una matrice di pixel attivi di dimensione 640x480.

Questa tecnologia è stata sviluppata principalmente per essere sfruttata nella sorveglianza, e precisamente per unire i vantaggi di una fotocamera e di un rivelatore di calore, che funziona tramite la radiazione infrarossa. Ha in comune con i metodi precedenti il vantaggio di non dovere utilizzare un filtro infrarosso, e riuscire ugualmente a distinguere la radiazione visibile da quella infrarossa. Uno svantaggio è quello di dover utilizzare dei processi tecnologici non standard di digital imaging, perché richiede tecnologie che permettono di usare impiantazioni ad alta energia; un altro svantaggio è quello di ottenere una risoluzione differente per i pixel RGB e il fotodiodo in profondità; questa tecnologia non standard non permette lo stesso scaling delle impiantazioni superficiali, che corrispondono alla risoluzione dell'immagine RGB, e delle impiantazioni ioniche in profondità, corrispondenti alla risoluzione dell'immagine infrarossa.

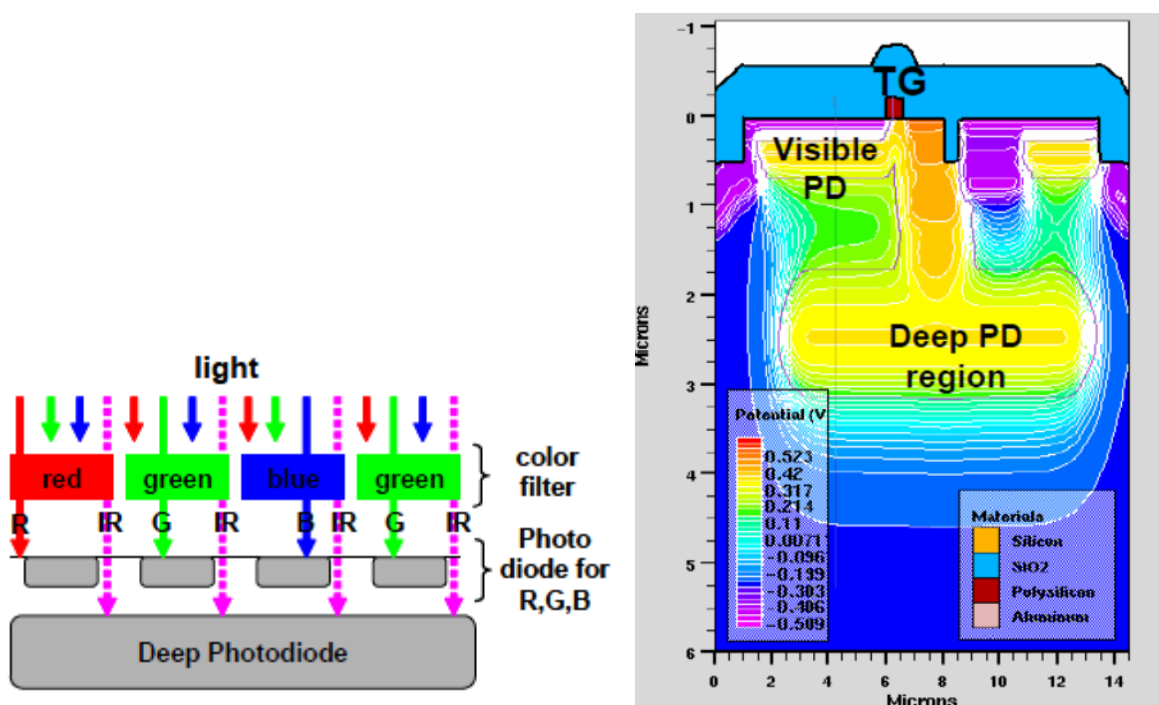


Figura 26 - (Sinistra) Sezione schematica di un dispositivo con VIPS. (Destra) Layout del dispositivo con rappresentazione colorata delle regioni equipotenziali.

Il sensore Foveon sfrutta l'assorbimento della radiazione luminosa a diverse profondità proporzionalmente alla lunghezza d'onda della luce incidente, e inoltre non necessita di alcun filtro infrarosso. Il principio di funzionamento del Foveon si presta perciò ad essere esteso per ottenere un quarto canale più in profondità per misurare la radiazione infrarossa; il limite è quello che non esiste alcun processo tecnologico che permetta di sovrapporre più di 3 Well, e per questo è irrealizzabile.

1.5 Possibilità di utilizzo del TFD per questi tipi di misure e suoi vantaggi

Ognuno dei metodi mostrati permette di acquisire la radiazione NIR attraverso differenti tecniche, grazie al suo principio di funzionamento anche il TFD può essere utilizzato per acquisire l'informazione della radiazione NIR; infatti il principio di funzionamento del TFD a 3 canali può essere sfruttato per realizzare un dispositivo con 4 canali distinti, di cui uno apposito per l'informazione NIR, come schematizzato in figura 27. Il principio di funzionamento rimane identico, infatti siccome il coefficiente di assorbimento ha una proporzionalità inversa con la

CAPITOLO 1

lunghezza d'onda, la radiazione NIR avendo una lunghezza d'onda maggiore della radiazione visibile, genererà delle cariche più in profondità, che verranno raccolte dal quarto anodo del TFD.

La struttura originale per il TFD simmetrico a 3 canali è composta da 5 anodi come mostrato in figura 9. I canali #1 e #2 hanno entrambi 2 anodi, e sono utilizzati per misurare rispettivamente la radiazione verde e rossa; il canale #0 è utilizzato invece per misurare la radiazione blu.

Siccome ogni anodo, tranne quello del blu nominato #0 nella figura 9, deve essere separato dall'altro da una struttura composta da due STI e una zona drogata P, l'aggiunta di un quarto anodo allunga considerevolmente la struttura, infatti dovrebbero essere aggiunti altri 2 anodi e le rispettive zone isolanti portando la dimensione del singolo pixel a circa 10 μm (per una tecnologia a 150 nm). Inoltre l'effettiva zona di raccolta delle cariche, dove i campi elettrici sono trasversali e ogni anodo raccoglie ad una differente profondità rispetto agli altri, è situata solamente al di sotto dell'anodo #0. Questo implica che una maggiore estensione del pixel a 4 canali non implica una maggiore area di raccolta della luce incidente, degradando così il fill factor del pixel; il fill factor è il rapporto tra la luce che incide l'area di pixel attiva e quella incidente tutto il pixel. Per focalizzare la luce solamente sulle zone volute in fase di progetto vengono aggiunte delle metallizzazioni sovrastanti il pixel, così da permettere alla luce di raggiungere solo la zona voluta. Un modo per migliorare il fill factor è quello di utilizzare delle microlenti che permettano di focalizzare la luce sulla parte voluta del dispositivo; le microlenti fanno parte dei processi standard nelle tecnologie per digital imaging, e il loro funzionamento è schematizzato in figura 4. Per non peggiorare il Fill Factor aumentando il numero di canali viene modificato il design mediante una struttura asimmetrica mostrata in figura 27. La struttura asimmetrica utilizza un anodo per ogni canale, e permette di ridurre la dimensione del pixel a 4 canali da 10 μm a 6 μm .

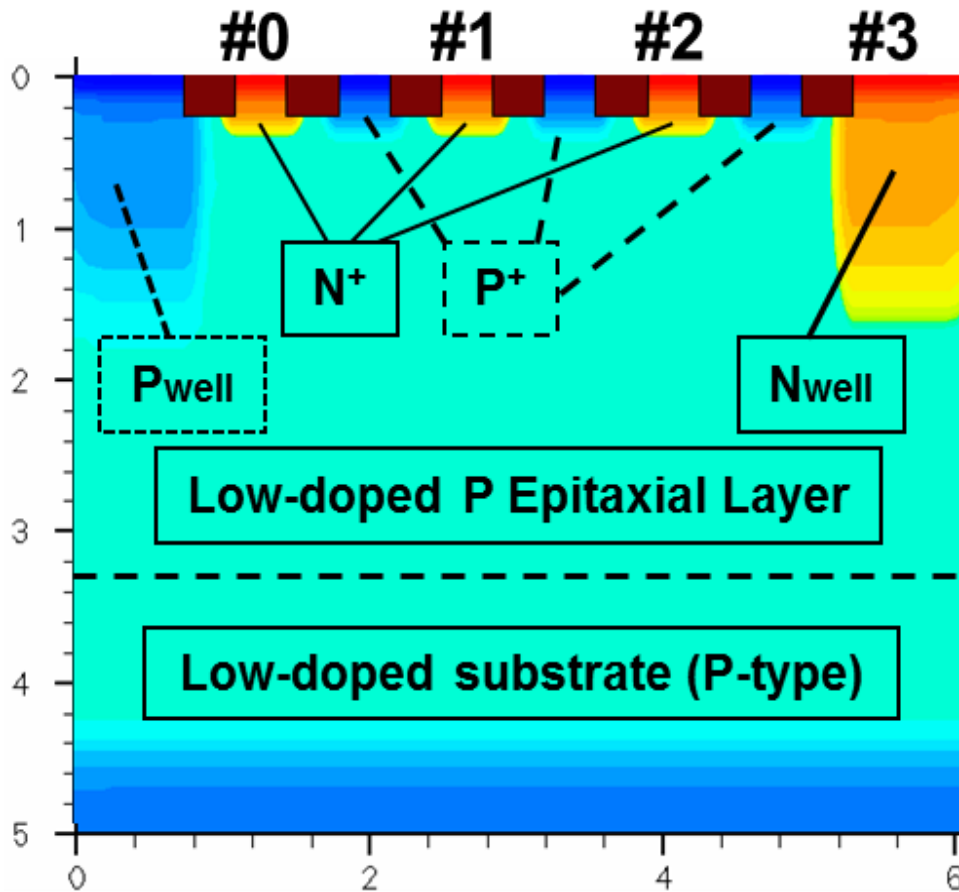


Figura 27 - E' una sezione del TFD a 4 colori in geometria asimmetrica realizzato con una tecnologia a 150 nm, in cui sono evidenziate le zone di drogaggio.

La Pwell viene utilizzata per bloccare il campo elettrico e isolare un pixel dall'altro. In figura 28 si vedono le linee trasversali del campo elettrico distinguersi per zona di raccolta al di sotto dell'anodo #0; sarà qua che attraverso delle metallizzazioni verrà indirizzata la luce incidente il pixel. In figura 28 si vede come la regione dove è presente la Pwell impedisca alle linee del campo elettrico di disturbare il pixel adiacente; la Pwell di ogni pixel isolerà il pixel da quello adiacente alla sua sinistra, per questo motivo in figura è mostrata una sola Pwell, poiché il pixel sarà isolato alla sua destra dalla Pwell del pixel adiacente alla sua destra.

CAPITOLO 1

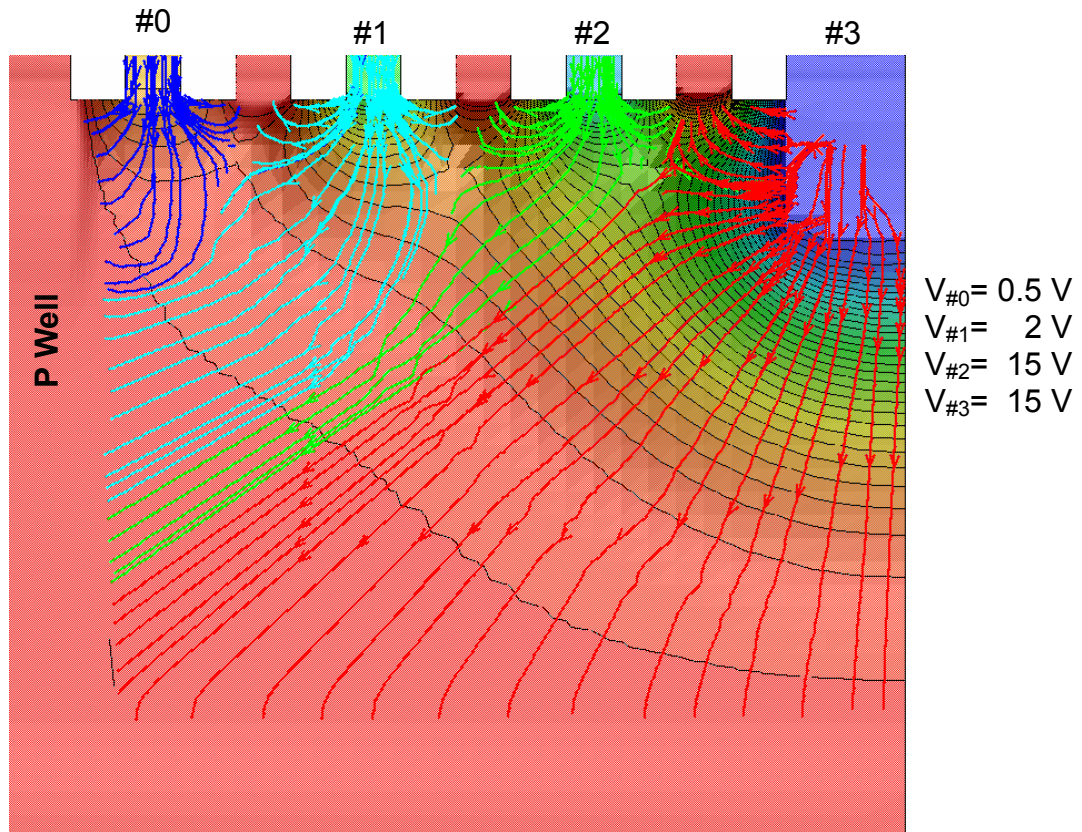


Figura 28 - Sezione dello stesso dispositivo mostrato in figura 27; anziché i drogaggi sono rappresentate le linee del campo elettrico che conducono ad ognuno dei 4 anodi. A parte sono specificate le tensioni a cui sono stati polarizzati i 4 anodi per ottenere questo campo elettrico.

Il canale aggiuntivo introdotto permette così di ottenere quattro risposte spettrali e acquisire l'informazione della radiazione infrarossa dal canale #3. Questo tipo di dispositivo non necessita di un "hot mirror" e si presta ad essere sfruttato in tutte le applicazioni discusse precedentemente, quali ad esempio l'HDR o il Dehazing. In particolare condivide anche i vantaggi del sensore Foveon X3, poiché anche il TFD non ha bisogno di tecniche di demosaiking, siccome ogni pixel acquisisce l'informazione relativa ad ogni colore. Un altro vantaggio evidente è che non ha bisogno di alcun filtro, RGB o infrarosso, permettendo di risparmiare nei costi di produzione; inoltre questo genere di struttura sfrutta tecnologie standard, che non hanno bisogno di cristalli fotonici o impiantazioni ioniche particolarmente energetiche come mostrato nelle tecniche precedenti.

Invece, alcuni dei potenziali svantaggi che potranno presentarsi sono:

- Il basso fill factor del pixel, che raccogliendo solamente la radiazione al di sotto dell'anodo #0, degrada all'aumentare del numero dei canali del dispositivo.

CAPITOLO 1

- A causa di una raccolta così in profondità dell'anodo #3, può verificarsi del cross talk per diffusione tra pixel adiacenti nel canale Nir.

Il capitolo seguente entrerà nei dettagli del principio di funzionamento del dispositivo, e mostrerà le prime simulazioni fatte per comprenderne le prestazioni nell'acquisizione simultanea visibile e Nir.

In questo capitolo si spiegherà il principio di funzionamento del TFD per la cattura simultanea dello spettro visibile e Nir, e in seguito verranno illustrate le caratteristiche che devono possedere le risposte spettrali al fine di essere ottimizzate per le applicazioni già esposte nel capitolo 1.

2 Il TFD a 4 canali per visibile e infrarosso

2.1 Principio di funzionamento

Come spiegato nel primo capitolo, il TFD si presta ad essere utilizzato per acquisire simultaneamente la radiazione infrarossa e visibile in un unico sensore monolitico. Il principio di funzionamento è simile a quello del TFD a 3 colori [7], e si basa sulla dipendenza tra il coefficiente di assorbimento del silicio e la lunghezza d'onda della luce incidente; il coefficiente $\alpha(\lambda)$ è il coefficiente di assorbimento e appare nella legge esponenziale di assorbimento:

$$I(x) = I_0 e^{-x \cdot \alpha(\lambda)} \quad 2.1$$

Dove I_0 è l'intensità della luce incidente una superficie, $I(x)$ è la luce in uscita dopo aver percorso una distanza x nel materiale e α il coefficiente di assorbimento del materiale, la coordinata $x=0$ corrisponde alla superficie del materiale. In figura 29 si può vedere il coefficiente di assorbimento di diversi materiali semiconduttori semplici e composti in funzione dalla lunghezza d'onda. Il silicio oltre ad essere il più comune semiconduttore utilizzato nei processi elettronici, e perciò anche il meno costoso, si presta all'utilizzo per i sensori di digital imaging grazie alla caratteristica del suo coefficiente di assorbimento; il coefficiente di assorbimento del silicio infatti varia di circa 2/3 ordini di grandezza nello spettro compreso tra i 400 nm e i 700 nm.

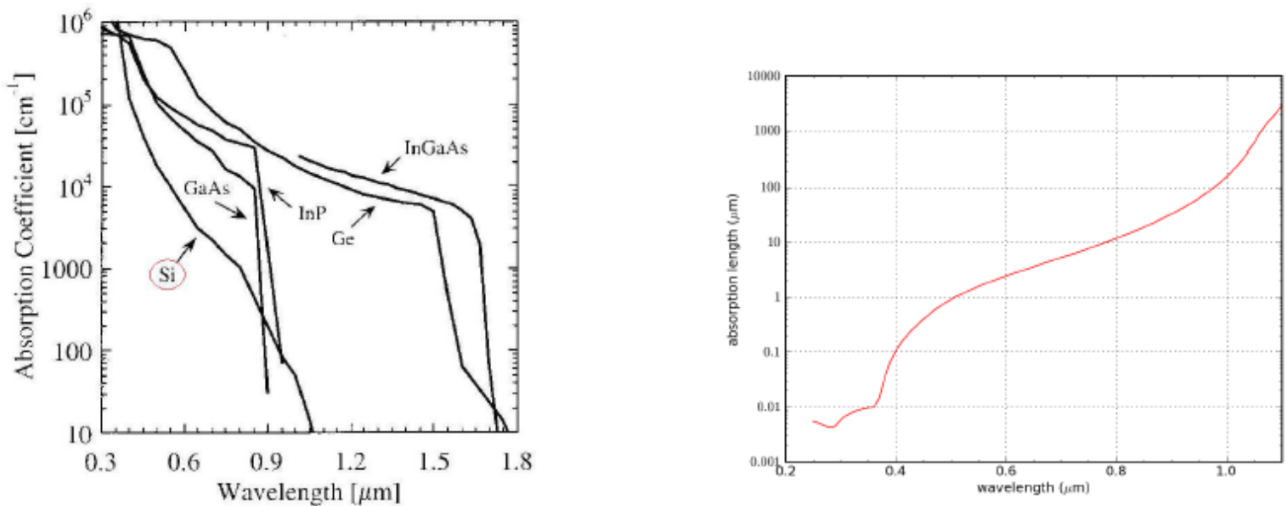


Figura 29 - (Sinistra) Sono rappresentati i coefficienti di assorbimento di alcuni semiconduttori semplici e composti. (Destra) E' mostrata la lunghezza di assorbimento del silicio in funzione della lunghezza d'onda.

Questa proprietà del silicio sta alla base del funzionamento del dispositivo TFD, infatti grazie al coefficiente di assorbimento che degrada così velocemente al crescere della lunghezza d'onda, le diverse lunghezze d'onda vengono assorbite in media a distanze sufficientemente distinte tra loro. Nel secondo grafico in figura 29 è rappresentata la lunghezza di assorbimento, che corrisponde al reciproco del coefficiente di assorbimento; la lunghezza di assorbimento corrisponde alla profondità entro cui le diverse lunghezze d'onda sono state assorbite per il 63%. Per calcolare la quantità di radiazione assorbita per ogni singola lunghezza d'onda si può derivare dalla 2.1, la quantità di radiazione assorbita in funzione alla profondità tramite la seguente relazione:

$$I_a(x) = I_0(1 - e^{-x \cdot \alpha(\lambda)}) \quad 2.2$$

Dove I_a è la intensità della radiazione assorbita dopo aver percorso una distanza x nel materiale rispetto alla superficie, $\alpha(\lambda)$ è il coefficiente di assorbimento proporzionale alla lunghezza d'onda, e I_0 è la intensità della radiazione incidente la superficie. Per calcolare invece la quantità di radiazione assorbita nella regione spaziale compresa tra 2 differenti profondità, chiamate ad esempio x_1 e x_2 , con $x_1 < x_2$, si utilizza una formula derivante dalla precedente:

$$I_a(x) = I_0(e^{-x_1 \cdot \alpha(\lambda)} - e^{-x_2 \cdot \alpha(\lambda)}) \quad 2.3$$

CAPITOLO 2

In questa relazione I_a è la radiazione assorbita nello spazio compreso tra le profondità x_1 e x_2 , I_0 è la radiazione incidente la superficie del materiale, e $\alpha(\lambda)$ è il coefficiente di assorbimento del materiale. Da qui in poi verrà utilizzato un parametro di merito che deriva dalle 2 formule appena enunciate, 2.2 e 2.3, l'efficienza η . L'efficienza η è il rapporto tra la luce incidente e la luce assorbita dal materiale ed è calcolata come:

$$\eta = 1 - e^{-x\alpha(\lambda)} \quad 2.4$$

Dove x è la distanza rispetto alla superficie percorsa dalla luce nel materiale, ed $\alpha(\lambda)$ è il coefficiente di assorbimento del materiale, proporzionale alla lunghezza d'onda.

Ad esempio tramite la 2.4 è possibile calcolare quale profondità è necessaria per assorbire una certa percentuale di luce a una certa lunghezza d'onda; ad esempio per assorbire il 90% della luce blu a $\lambda = 400 \text{ nm}$ è necessaria una profondità di $0.23 \mu\text{m}$, mentre ad esempio per assorbire il 90% della luce verde a $\lambda = 550 \text{ nm}$ è necessaria una profondità di $2,3 \mu\text{m}$; così al crescere della lunghezza d'onda la luce sarà assorbita in uno spessore sempre maggiore di materiale. Invece le radiazioni ultraviolette, ossia quelle con una lunghezza d'onda minore di 400 nm , hanno un coefficiente di assorbimento così elevato che secondo lo stesso principio vengono assorbite tutte dalla superficie del materiale ricombinandosi immediatamente, rendendo così impossibile la loro misura tramite un dispositivo in silicio.

La proprietà fisica dell'assorbimento della luce in un materiale, è utilizzata nel TFD per distinguere la lunghezza d'onda della luce che genera le cariche raccolte dagli anodi del dispositivo. Nel design del TFD a 4 anodi, viene utilizzato un quarto canale #4 per raccogliere la radiazione infrarossa NIR, che è solo una piccola parte dell'intero spettro infrarosso, come spiegato nel precedente capitolo. I singoli anodi #1 #2 #3 e #4 sono isolati tra loro tramite un isolamento composto da STI, P⁺,STI, che ha l'obbiettivo di isolare tra loro i diversi anodi e prevenire fenomeni di punch-through.

Gli anodi drogati n⁺ e polarizzati con tensioni positive formano con il substrato, mantenuto a massa, una regione di svuotamento; nella regione di svuotamento sarà presente un campo elettrico, e le sue linee di forza avranno direzioni dipendenti dalle tensioni applicate agli anodi; normalmente le linee di campo in un diodo sono verticali, ad esclusione delle zone di bordo, nel

CAPITOLO 2

TFD viene aggiunta una componente orizzontale al campo elettrico mediante l'utilizzo di tensioni diverse ai diversi anodi del dispositivo; in particolare vengono applicate delle tensioni di valore crescente, in modo tale che $V_1 \leq V_2 \leq V_3 \leq V_4$, dove V_1 è la tensione dell'anodo Blu, V_2 è la tensione dell'anodo Verde, V_3 è la tensione dell'anodo Rosso, e V_4 è la tensione dell'anodo Nir; gli anodi polarizzati a tensioni maggiori, tenderanno a piegare le linee del campo elettrico degli anodi polarizzati a tensioni minori, così da creare il caratteristico campo elettrico trasversale del TFD. E' quindi possibile entro un certo limite, polarizzando gli anodi a tensioni crescenti, piegare le linee di forza del campo elettrico e modificarne la geometria, come è mostrato in figura 28; le linee colorate rappresentano le linee di forza del campo elettrico, ed è evidente come ognuna porti univocamente ad un solo anodo. Gli elettroni, generati dall'assorbimento della luce, seguono le linee di forza perché attratti dalla tensione positiva degli anodi, e dipendentemente da dove sono stati generati, seguono la traiettoria ad un determinato anodo. La capacità di distinguere la lunghezza d'onda della luce incidente, senza alcun filtro CFA, è dovuta proprio alla capacità di distinguere la profondità di generazione degli elettroni, che come spiegato nel paragrafo precedente, è proporzionale alla lunghezza d'onda. Gli elettroni che arrivano agli anodi formano una corrente elettrica positiva, proporzionale al numero di cariche, e perciò proporzionale anche alla intensità della luce incidente; misurando la corrente di ogni anodo è possibile ricavare le informazioni del colore incidente sul pixel. Questo è il principio di funzionamento del dispositivo e il design e i metodi di misura delle correnti sono trattati nei rispettivi capitoli 3 e 4.

2.2 Simulazioni Matlab semplificate

Le simulazioni che più si avvicinano al comportamento reale del dispositivo sono quelle ottenute utilizzando un simulatore apposito per dispositivi elettronici, come ad esempio il software Dessim (Device Simulation for Smart Integrated Systems). Le simulazioni ottenute tramite un simulatore apposito, come Dessim, sono sì più realistiche, ma hanno lo svantaggio di impiegare molto tempo per essere ottenute ed analizzate; infatti per ogni simulazione bisogna una volta implementato il dispositivo polarizzato, simulare il comportamento in presenza della radiazione incidente, e successivamente analizzare i dati ottenuti con altri software come Matlab. Per questo motivo, per valutare la possibilità di implementare un dispositivo per

CAPITOLO 2

acquisire contemporaneamente la radiazione visibile e infrarossa, è stato utilizzato inizialmente un approccio semplificato tramite Matlab; queste prime simulazioni preliminari sono state anche eseguite per ricercare un set di risposte spettrali ottimali da ricercare in fase di simulazione Dessis.

Nel dispositivo reale le risposte spettrali sono calcolate tramite la misura della corrente misurata ad ogni anodo. Per misurare la risposta spettrale di un canale del dispositivo, viene misurata come varia la corrente in quel canale al variare della lunghezza d'onda incidente il pixel. Misurando la corrente misurata da ogni pixel ad ogni determinata lunghezza d'onda, è possibile generare le risposte spettrali assolute del dispositivo. Se la corrente di un canale viene normalizzata per la somma delle correnti di tutti i canali, si ottiene un numero adimensionale che rappresenta il filtro equivalente di quello specifico anodo; normalizzando invece ogni canale singolarmente si ottengono le risposte spettrali relative di ogni canale come sono mostrate in un esempio in figura 32. La forma di queste risposte spettrali è funzione di diversi fattori, come la geometria del campo elettrico e la porzione di area illuminata del dispositivo.

Le risposte spettrali non hanno un ottimo assoluto da ricercare, ma dipendono dall'applicazione considerata; in questa Tesi il dispositivo è stato ottimizzato per misurare la luce strutturata a 850 *nm* e utilizzarla per le misure di distanza, secondo uno schema semplificato riportato in figura 30; questa è solo una delle possibili applicazioni della radiazione Nir, altre possibili applicazioni della luce strutturata sono già state mostrate nel paragrafo 1.3.4.

In figura 30 viene schematizzato un sistema di misura della luce strutturata; la sorgente IR a 850 nm, emette una luce codificata sulla scena, il detector VIS+NIR rappresenta il TFD, ed è in grado di misurare sia la luce strutturata infrarossa, sia la luce visibile. La geometria della scena, deforma la luce strutturata incidente, e questa deformazione è proporzionale alla distanza della scena dalla sorgente; dopo l'acquisizione, le informazioni riguardo la luce visibile e quella infrarossa misurata dal detector sono separate, in modo così da poter analizzare singolarmente le informazioni della luce strutturata infrarossa acquisita, e calcolare la distanza dell'emettitore dalla scena.

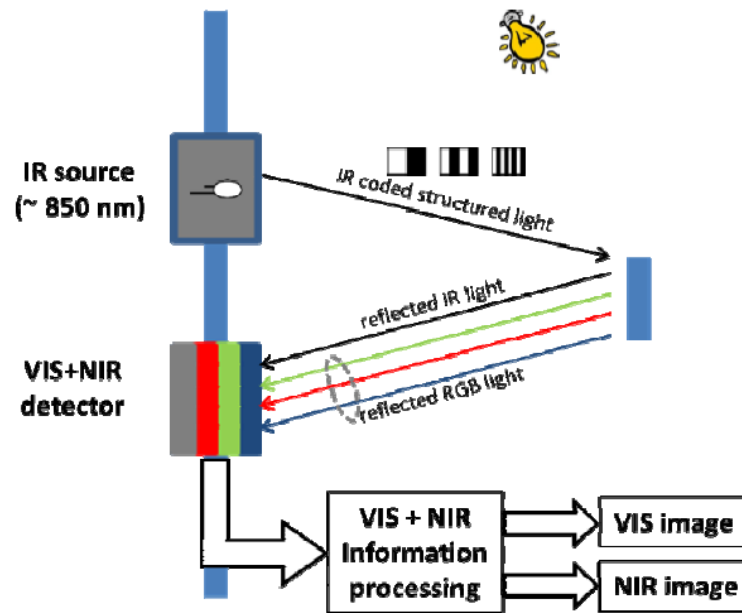


Figura 30 - Rappresentazione schematica del sistema di emissione e acquisizione di luce strutturata.

Il TFD si presta molto bene a questa applicazione, poiché è uno dei pochi dispositivi monolitici in grado di rilevare sia la luce visibile sia infrarossa; il TFD permette di acquisire l'immagine a colori come ogni dispositivo per il digital imaging, ma in più permette di rilevare la luce strutturata a lunghezze d'onda nel NIR. Proiettando una luce strutturata nel NIR è possibile non interferire con l'immagine da analizzare, come succederebbe ad esempio proiettando una luce strutturata nello spettro visibile.

Tramite Matlab sono stati simulati dei dispositivi dalle geometrie semplificate, come mostrato in figura 31; questa figura rappresenta il modello semplificato di un TFD, e precisamente rappresenta l'epistrato del dispositivo; l'epistrato nel dispositivo reale tramite una polarizzazione opportuna, come spiegato in precedenza, viene svuotato da cariche libere e viene polarizzato in modo da ottenere delle linee di campo trasversali come in figura 28. Queste linee di campo trasversali raccolgono le cariche generate dall'assorbimento della luce, e dipendentemente dalla zona in cui la carica viene generata, il campo elettrico la attira verso un determinato anodo. Per ottenere un modello semplificato della geometria dei campi elettrici in Matlab, il substrato del dispositivo viene suddiviso in regioni di raccolta come mostrato in figura 31; per semplificazione ogni carica generata in una regione viene considerata, al fine del calcolo dei filtri equivalenti, come se assorbita dall'anodo corrispondente alla determinata regione; ciò vuol dire,

che la simulazione Matlab non simula lo spostamento delle cariche ai rispettivi anodi in funzione delle linee di forza del campo elettrico; la simulazione, per semplicità, associa tutte le cariche generate in una regione di raccolta, all'anodo di raccolta associato a quella regione. Le geometrie semiellittiche cercano di rappresentare la geometria dei campi elettrici nel substrato del TFD.

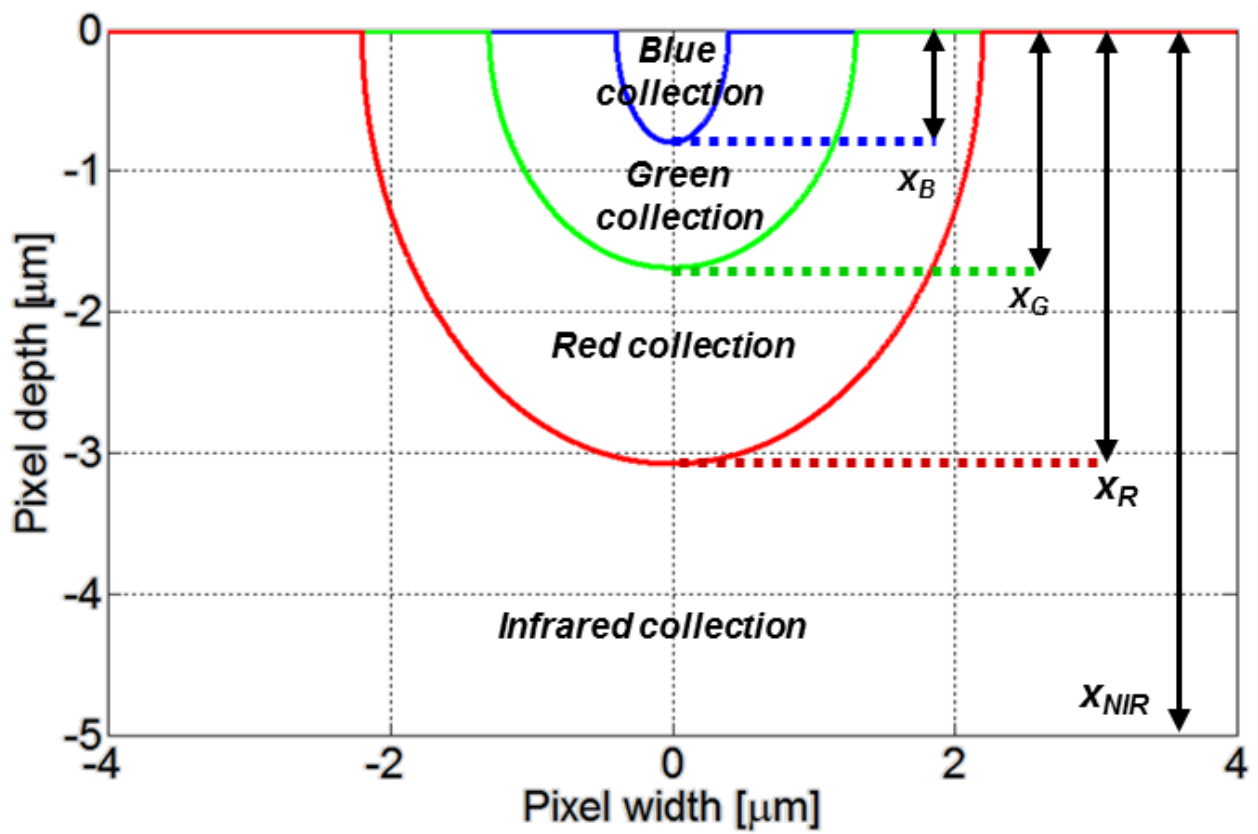


Figura 31 - Sezione del TFD modellizzato tramite Matlab. In figura sono evidenziate le 4 regioni di raccolta e rispettive profondità x_B , x_G , x_R , x_{NIR} .

Queste simulazioni sono state fatte tenendo conto del principio di funzionamento del dispositivo esposto in precedenza in questo capitolo. Tramite la legge esponenziale di assorbimento, 2.1, e utilizzando dei coefficienti di assorbimento del silicio tabulati è possibile simulare l'assorbimento di una singola lunghezza d'onda in tutto lo spessore del dispositivo; estendendo questo procedimento a tutte le lunghezze d'onda interessate e integrando l'assorbimento solo in certi spessori scelti è stato possibile riprodurre delle risposte spettrali simulate mostrate in figura 32.

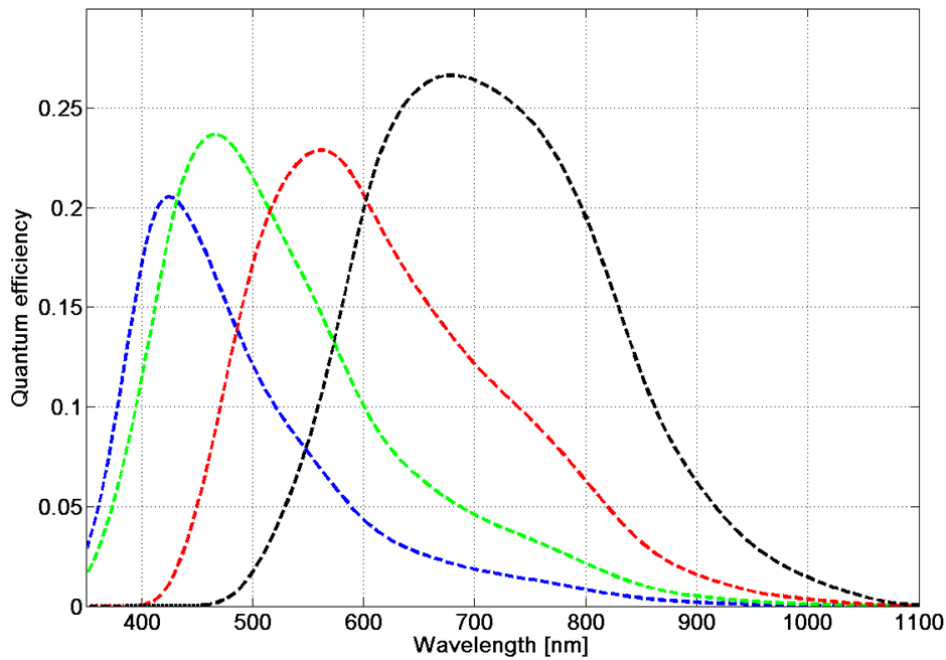


Figura 32 - Risposte spettrali del dispositivo schematizzato in figura 31. I colori delle curve rappresentano l'anodo a cui sono associate, blu, verde, rosso e nero per il Nir.

Queste simulazioni Matlab, oltre ad essere più veloci rispetto a quelle ottenute mediante Dessis, hanno il vantaggio di poter scegliere a priori le profondità di raccolta dei diversi canali tramite i valori di x_B , x_G , x_R , x_{NIR} riportati in figura 31; inoltre è possibile decidere anche la porzione di dispositivo da illuminare, infatti le risposte spettrali sono funzione non solo delle profondità di raccolta, ma anche della regione spaziale illuminata.

In questo modo è possibile simulare il comportamento del dispositivo ottenendone le risposte spettrali, ma senza tenere conto della polarizzazione dei diversi anodi; inoltre non è necessario dover attendere le numerose ore necessarie per simulare il comportamento del dispositivo illuminato utilizzando Dessis, impiegando invece solo qualche secondo tramite Matlab.

Uno svantaggio di questo approccio è quello che la simulazione non tiene conto di diverse non idealità come la diffusione delle cariche; questo è un fenomeno che genera uno spostamento delle cariche, che si spostano in zone a minore densità di concentrazione, in aggiunta allo spostamento dovuto alla forza esercitata dal campo elettrico. Un altro fenomeno, non tenuto in considerazione dalle simulazioni Matlab, è quello della ricombinazione delle cariche, infatti può capitare che l'elettrone generato dall'assorbimento della luce, anziché transitare verso l'anodo e generare una corrente di segnale, si ricombini con una lacuna; ciò può accadere nonostante il

dispositivo sia svuotato da cariche libere, perchè l'assorbimento della luce non libera solo un elettrone, ma genera una coppia elettrone lacuna, e queste lacune, che vengono attratte dai contatti p, possono provocare una ricombinazione delle cariche. Inoltre il campo elettrico trasversale, che permette una raccolta delle cariche in funzione della profondità in cui sono generate, nella realtà è modificabile solo entro certi limiti tramite la polarizzazione; non è possibile perciò ricreare con facilità il campo elettrico con le stesse profondità di raccolta utilizzate nelle simulazioni Matlab.

2.3 Criteri di ottimizzazione

L'applicazione per cui è stato ottimizzato il dispositivo è quella di rilevare una luce strutturata a 850 nm, è perciò necessario fare delle scelte di design che siano adatte all'applicazione. Siccome non esiste un set ottimo assoluto di risposte spettrali, ma dipendono dalle applicazioni, sono stati tenuti in considerazione diversi criteri da perseguire coerenti con l'applicazione scelta.

2.3.1 Fedele riproduzione del colore

Il primo criterio di merito è stato quello di mantenere una sufficientemente fedele riproduzione del colore, pur eliminando il filtro IR. Per fare dei confronti ed avere dei termini di paragone oggettivi della qualità delle risposte spettrali, bisogna passare dallo spazio colore del dispositivo, rappresentato dalle sue risposte spettrali, ad un spazio colore indipendente (ad esempio il più comune è lo spazio CIE 1931 XYZ). Lo spazio colore è una rappresentazione matematica che descrive un modo per rappresentare i colori come combinazione di numeri, tipicamente tre o quattro, detti componenti colore. Questa modellizzazione del colore permette di confrontare così lo spazio colore di diversi dispositivi e valutarne la qualità.

La percezione del colore nell'occhio umano avviene tramite tre diversi foto ricettori detti coni, presenti nella retina dell'occhio; questi coni sono di tre tipi differenti ed ognuno ha dei picchi di sensitività per lunghezze d'onda differenti, corte (S, $\lambda=420-440$ nm), medie (M, $\lambda=530-540$ nm), e lunghe (L, $\lambda=560-580$ nm). La sensazione cromatica è quindi derivata dalla

combinazione degli stimoli di questi tre differenti foto ricettori, ed è per questo che la luce è una grandezza vettoriale rappresentabile tramite tre dimensioni; la combinazione degli stimoli dei tre coni è anche detto tristimolo.

Gli spazi colore sono quindi necessari per poter associare i valori del tristimolo dell'occhio umano ai colori. Lo spazio colore più comune, dal quale la maggior parte degli altri spazi colore è derivata, è lo spazio CIE XYZ; lo spazio CIE, tramite 3 diverse funzioni dette Color Matching Function e una distribuzione spettrale di potenza $I(\lambda)$, permette di trovare i valori del tristimolo, X, Y, Z associati alla distribuzione spettrale $I(\lambda)$. L'operazione che permette di ottenere i valori del tristimolo è la seguente:

$$X = \int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad Y = \int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad Z = \int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \quad 2.5$$

Dove $\bar{x}(\lambda)$ $\bar{y}(\lambda)$ $\bar{z}(\lambda)$ sono le matching function rappresentate in figura 33.

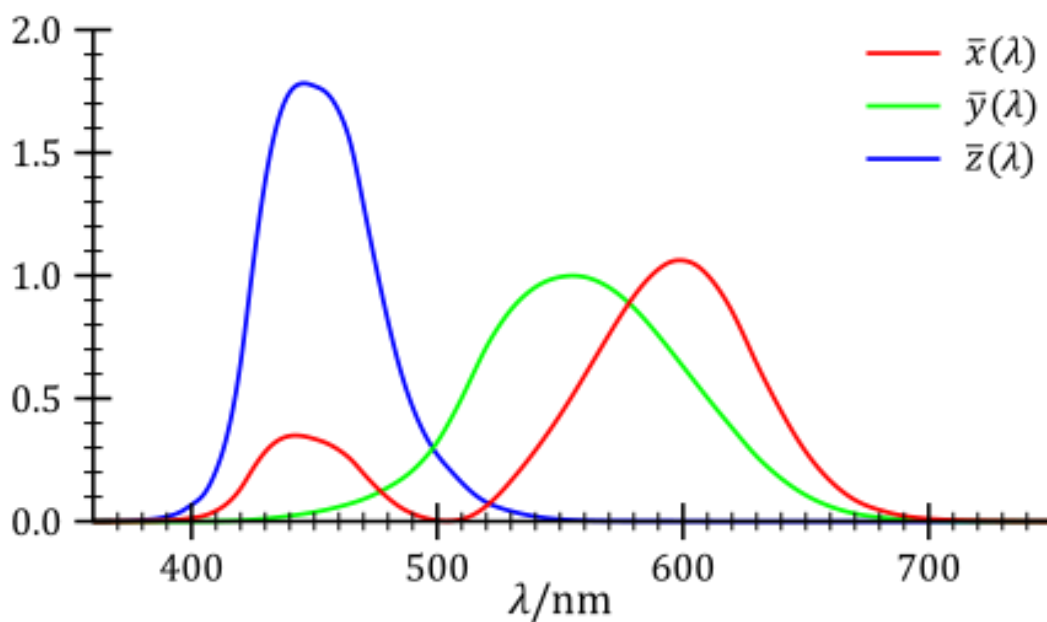


Figura 33 - Rappresentazione grafica delle 3 matching function.

La tecnica meno complessa computazionalmente per spostarsi dallo spazio colore del dispositivo allo spazio colore XYZ del tristimolo è tramite una Matrice di Correzione del Colore (CCM). Tramite la CCM è possibile ottenere le coordinate X'Y'Z' approssimate tramite un'operazione lineare, 2.6, a costo però di commettere degli errori di trasformazione; infatti, la

CAPITOLO 2

trasformazione lineare delle risposte spettrali del dispositivo nello spazio XYZ, introduce inevitabili errori, poichè le risposte spettrali del dispositivo non sono combinazione lineari delle matching function.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = CCM \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad 2.6$$

La Matrice di correzione del colore, CMM, è ottenuta tramite la minimizzazione dell'errore di ricostruzione del colore su un numero n di campioni spettrali limitato e di interesse, e precisamente si ottiene tramite la formula seguente:

$$CCM = \begin{bmatrix} X_q \\ Y_q \\ Z_q \end{bmatrix} \cdot PINV \cdot \left(\begin{bmatrix} R_q \\ G_q \\ B_q \end{bmatrix} \right) \quad 2.7$$

Il pedice q indica un vettore riga di n elementi; le colonne della matrice $\begin{bmatrix} X_q \\ Y_q \\ Z_q \end{bmatrix}$ perciò rappresentano le coordinate X, Y e Z dei campioni colore scelti nello spazio del tristimolo; le colonne della matrice $\begin{bmatrix} R_q \\ G_q \\ B_q \end{bmatrix}$ invece rappresentano le coordinate degli stessi campioni, ma nello spazio colore del dispositivo. Nel caso del TFD i valori R,G,B saranno proporzionali alle fotocorrenti misurate agli anodi; inoltre nel TFD a 4 canali si aggiunge un ulteriore canale ai 3 già citati, quello che misura la radiazione NIR. PINV rappresenta la matrice pseudo-inversa, che è la generalizzazione della matrice inversa nel caso in cui la matrice non sia quadrata [24]. Nel caso del TFD a 4 canali quindi le formule precedenti diventano rispettivamente:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = CCM \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ NIR \end{bmatrix} \quad CCM = \begin{bmatrix} X_q \\ Y_q \\ Z_q \end{bmatrix} \cdot PINV \cdot \left(\begin{bmatrix} R_q \\ G_q \\ B_q \\ NIR_q \end{bmatrix} \right)$$

La Matrice CCM nel caso di TFD a 4 canali non sarà più quadrata, con dimensione 3x3, come nel caso RGB, ma invece avrà dimensioni 3x4. La CCM permette quindi di poter passare dallo spazio colore del dispositivo ad uno spazio colore comune; in questo modo è possibile avere

CAPITOLO 2

dei criteri di merito della qualità di riproduzione del colore del dispositivo. Siccome è una trasformazione lineare e per come la CCM è costruita, il passaggio nello spazio colore XYZ introdurrà degli errori sistematici; solamente se le risposte spettrali del dispositivo fossero combinazioni lineari di quelle dell'occhio umano non ci sarebbero errori di trasformazione (condizione di Luther). Per questo motivo, applicando la trasformazione mediante la 2.6 alle coordinate RGB di un colore campione, si otterranno delle coordinate XYZ diverse da quelle originali del campione, che sono state utilizzate per ottenere la CCM nella formula 2.7. Lo spazio XYZ però non è percettivamente uniforme, il che vuol dire che ad uno stesso errore nei valori del colore (in questo caso le coordinate XYZ), non corrisponde all'occhio umano una variazione di colore della stessa importanza.

L'errore introdotto dalla matrice di trasformazione CCM, è di tipo sistematico e si presenta ad ogni misura, e non può essere ridotto con la media di diverse misure come invece l'errore statistico.

Al fine di ottenere un parametro di merito della riproduzione del colore rilevante, si utilizza uno spazio colore percettivamente uniforme. Lo spazio percettivamente uniforme, che è stato utilizzato per la valutazione della riproduzione del colore del TFD, è lo spazio Lab; lo spazio Lab è una trasformazione non lineare dello spazio XYZ ed è composto da tre coordinate L^*, a^*, b^* . La coordinata L rappresenta la luminosità, mentre le coordinate a e b rappresentano la cromaticità; siccome è uno spazio percettivamente uniforme una uguale variazione dei valori a^* e b^* , produce una uguale variazione del colore percepita. Per questo motivo per ottenere un criterio oggettivo di paragone di qualità del dispositivo si utilizza l'errore commesso nello spazio LAB; questo errore da qui in poi lo chiameremo $\Delta E_{a^*b^*}$ e viene calcolato come:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad 2.8$$

Δa^* così come Δb^* sono una differenza tra due coordinate a^* e b^* nello spazio colore Lab, $\Delta a^* = a_1^* - a_2^*$, $\Delta b^* = b_1^* - b_2^*$. Una coppia di coordinate, a_1^* e b_1^* , sono ottenute partendo dallo spazio XYZ, e utilizzando le coordinate $X_1 Y_1 Z_1$ del colore campione, ottenute tramite le matching function 2.6. L'altra coppia di coordinate a_2^* e b_2^* sono ottenute sempre a partire dallo spazio XYZ, ma le coordinate di partenza $X_2 Y_2 Z_2$, non sono ottenute tramite le matching function, ma tramite la trasformazione lineare operata dalla CCM, 2.7, partendo dalle coordinate del colore campione nello spazio colore del dispositivo.

CAPITOLO 2

Come colori campioni di riferimento sono stati utilizzati i colori della mappa Macbeth figura 34, che rappresentano i colori tramite le loro riflettanze spettrali; questi sono colori che rappresentano quelli più comuni, come ad esempio la pelle umana o la vegetazione.



Figura 34 – Rappresentazione grafica di una carta colore (Macbeth Color Checker).

L'errore $\Delta E_{a^*b^*}$, 2.8, è stato il parametro tenuto in considerazione per considerare la qualità di riproduzione del colore da parte del dispositivo. Il codice Matlab che è stato implementato per valutare l'errore $\Delta E_{a^*b^*}$ è riportato in appendice.

2.3.2 Bassa propagazione del rumore elettronico

Un ulteriore criterio di ottimizzazione scelto è dovuto al rumore elettronico presente in fase di lettura; il rumore elettronico è di tipo statistico e modificherà i valori misurati ai 4 anodi del TFD; il rumore elettronico è introdotto dall'elettronica di lettura utilizzata per amplificare i segnali misurati, e degrada il segnale misurato [4]. L'errore statistico nelle applicazioni di digital imaging non può essere mediato, poiché è possibile una sola acquisizione di ogni scena. Per ridurre la propagazione di questo rumore e minimizzare il suo impatto sulla ricostruzione del colore, bisogna avere una matrice di conversione del colore CCM con certe caratteristiche.

CAPITOLO 2

La matrice di conversione CCM ottenuta come spiegato precedentemente, e necessaria per passare dallo spazio colore del dispositivo ad uno spazio colore standard, sarà composta da coefficienti sia positivi sia negativi; i coefficienti negativi con un valore assoluto elevato producono una elevata riduzione del segnale perché sottraggono due termini, con una contemporanea amplificazione del rumore statisticamente sommato. Per questo motivo nell'ottimizzazione si è cercato di minimizzare il valore assoluto dei termini negativi, per impedire in questo modo la propagazione degli errori statistici.

In genere i coefficienti negativi della matrice di conversione CCM sono legati al troppo overlap tra le risposte spettrali del dispositivo; i coefficienti negativi aumentano in modulo con l'aumentare della sovrapposizione delle risposte spettrali; per questo motivo dalle risposte spettrali linearmente indipendenti e con i picchi molto distinti tra loro, si ottengono CCM con termini negativi minori in modulo. Il TFD non possedendo filtri fisici, come i sensori che utilizzano i CFA, e siccome le profondità di generazione delle cariche elettriche generate è solo statisticamente funzione della lunghezza d'onda, presenta delle zone di overlap parecchio evidenti come si può notare in figura 32. Per questo motivo, in fase di progettazione, bisogna porre molta cura nell'ottenere risposte spettrali che generino una CCM con coefficienti negativi ridotti in modulo.

Siccome lo spazio standard CIE XYZ è uno spazio a 3 dimensioni, e il TFD misura l'informazione da 4 canali diversi, è possibile calcolare e ottimizzare la matrice CCM tramite un passaggio intermedio rispetto a quello spiegato precedentemente; anziché applicare immediatamente la matrice pseudo inversa alle risposte spettrali ottenute tramite la Macbeth, è possibile dividere in 2 operazioni il passaggio dallo spazio colore proprio del dispositivo a quello standard CIE XYZ, come mostrato in seguito [8].

$$CCM = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & c_{2,3} \\ c_{3,1} & c_{3,2} & c_{3,3} \end{bmatrix}$$

$$M_{NIR} = \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & d_{1,3} & d_{1,4} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & d_{2,3} & d_{2,4} \\ d_{3,1} & d_{3,2} & d_{3,3} & d_{3,4} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & c_{2,3} \\ c_{3,1} & c_{3,2} & c_{3,3} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & d_{1,3} & d_{1,4} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & d_{2,3} & d_{2,4} \\ d_{3,1} & d_{3,2} & d_{3,3} & d_{3,4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B \\ G \\ R \\ NIR \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & c_{1,3} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & c_{2,3} \\ c_{3,1} & c_{3,2} & c_{3,3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B' \\ G' \\ R' \end{bmatrix}$$

La prima operazione, quella che moltiplica la matrice M_{NIR} per la coordinate RGBNIR, è quella di passaggio dallo spazio colore a 4 dimensioni del dispositivo $[b(\lambda), g(\lambda), r(\lambda), nir(\lambda)]$ ad uno spazio colore a 3 dimensioni $[b'(\lambda), g'(\lambda), r'(\lambda)]$. Questa operazione è eseguita dalla matrice 3×4 M_{NIR} . L'operazione della matrice M_{NIR} è quella di sottrarre il colore non desiderato dalla zona infrarossa dalle 3 risposte $b(\lambda), g(\lambda), r(\lambda)$, e opera la stessa funzione che avrebbe un filtro infrarosso con una frequenza di cut off di 700-750 nm.

La matrice CCM invece opera una conversione nello spazio standard CIE XYZ, tramite un matching dei 24 colori della mappa colore della Macbeth, come spiegato precedentemente.

Per ottenere una bassa propagazione del rumore elettronico, bisogna che i coefficienti negativi di entrambe le matrici M_{NIR} e CCM abbiano un valore assoluto sufficientemente piccolo; i coefficienti negativi sottraggono il segnale utile, ma il rumore elettronico viene sempre sommato, e perciò si degrada il rapporto segnale rumore.

Si mette ora in evidenza una caratteristica peculiare delle risposte spettrali del TFD; per ottenere delle matrici di conversioni con piccoli coefficienti negativi è possibile considerare la proporzionalità delle risposte spettrali nello spettro infrarosso ($\lambda > 780$ nm). In questa zona dello spettro, l'inverso del coefficiente di assorbimento $1/\alpha$ (figura 29), è molto maggiore della profondità di raccolta dei diversi canali x_B, x_G, x_R, x_{NIR} . Per questo motivo l'efficienza di raccolta dei diversi canali nello spettro NIR può essere approssimata mediante la sua approssimazione lineare:

$$\eta_B = 1 - e^{-\frac{x_B}{\alpha(\lambda)}} \cong \frac{x_B}{\alpha(\lambda)}, \quad \eta_G \cong \frac{x_G}{\alpha(\lambda)} - \frac{x_B}{\alpha(\lambda)}, \quad \eta_R \cong \frac{x_R}{\alpha(\lambda)} - \frac{x_G}{\alpha(\lambda)}, \quad \eta_{NIR} \cong \frac{x_{NIR}}{\alpha(\lambda)} - \frac{x_R}{\alpha(\lambda)}$$

Queste efficienze quantiche sono valide solamente nello spettro infrarosso con $\lambda > 780$ nm, dove le quattro risposte spettrali sono proporzionali tra loro, come si può vedere in figura 35.

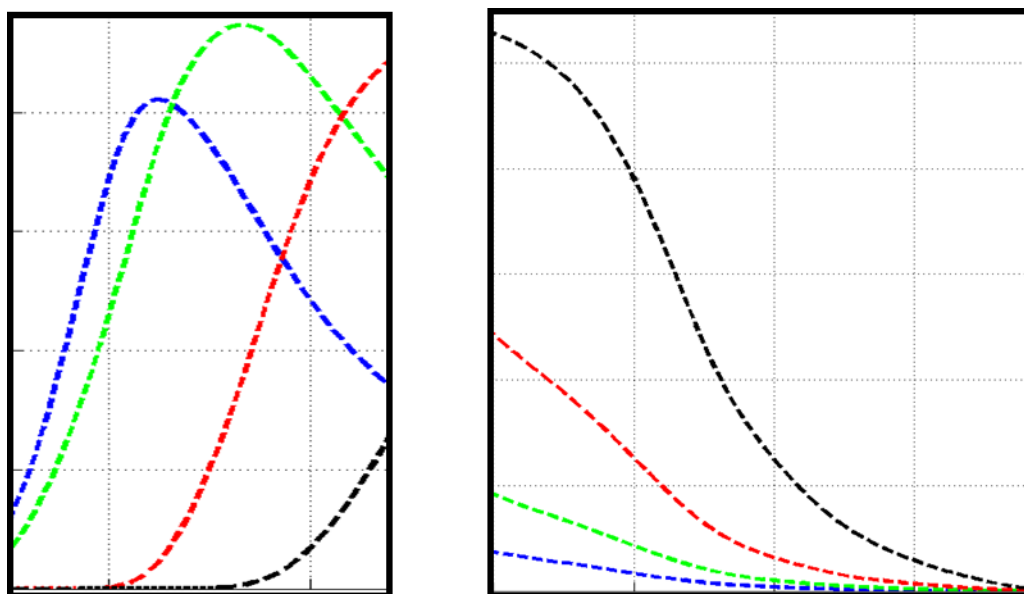


Figura 35 - (Sinistra) Particolare delle risposte spettrali a corte lunghezze d'onda $400 \text{ nm} < \lambda < 500 \text{ nm}$. (Destra) Particolare delle risposte spettrali nell'infrarosso $\lambda > 780 \text{ nm}$.

Si può notare dalle approssimazioni come le differenti efficienze quantiche siano proporzionalmente lineari alle diverse profondità di raccolta x_i ; al contrario alle corte lunghezze ($\lambda < 500 \text{ nm}$) d'onda la risposta spettrale del canale NIR è quasi nulla come si può vedere in figura 35. Per questo motivo l'infrarosso può essere cancellato dai 3 canali blu, verde e rosso, semplicemente tramite una sottrazione lineare. Di conseguenza la matrice M_{NIR} possiede gli elementi diagonali $d_{i,i}$ quasi unitari, mentre gli elementi della quarta colonna $d_{i,4}$ sono negativi e rappresentano la sottrazione del canale NIR. I coefficienti $d_{i,4}$ responsabili della sottrazione del canale NIR sono strettamente proporzionali alla profondità di raccolta dei diversi anodi:

$$d_{1,4} \cong \frac{\eta_B}{\eta_{\text{NIR}}} = \frac{x_B}{x_{\text{NIR}} - x_R}, \quad d_{2,4} \cong \frac{\eta_G}{\eta_{\text{NIR}}} = \frac{x_G - x_B}{x_{\text{NIR}} - x_R}, \quad d_{3,4} \cong \frac{\eta_R}{\eta_{\text{NIR}}} = \frac{x_R - x_G}{x_{\text{NIR}} - x_R}$$

Siccome questi coefficienti negativi della matrice M_{NIR} hanno tutti un valore assoluto molto ridotto, la matrice non introdurrà una significativa propagazione del rumore. I valori B' , G' e R' ottenuti tramite la matrice M_{NIR} corrispondono alle coordinate del colore nello spazio colore del sensore dopo la sottrazione della radiazione NIR non voluta.

Questo passaggio intermedio di sottrazione del canale infrarosso siccome ha dei coefficienti negativi ridotti, non introduce un significativo errore. Questo procedimento è utilizzato per comprendere quale dei due passaggi, filtraggio infrarosso equivalente o conversione dello

spazio colore, introduce i maggiori coefficienti negativi, e quindi amplifica maggiormente il rumore elettronico.

Successivamente per ottenere la matrice CCM e completare il passaggio dallo spazio colore del dispositivo a quello CIE XYZ, si utilizza la matrice pseudo inversa come spiegato nel paragrafo precedente.

2.3.3 Efficienza quantica alla lunghezza d'onda di interesse

Un altro criterio tenuto in considerazione per l'ottimizzazione del dispositivo è stata l'efficienza quantica del dispositivo alla lunghezza d'onda della luce strutturata che si intende utilizzare. La lunghezza d'onda per cui si vuole ottimizzare il dispositivo è $\lambda = 850 \text{ nm}$, questa lunghezza d'onda fa parte dello spettro NIR e per questo la sua radiazione genererà delle cariche per la maggior parte acquisite dal quarto canale; l'obiettivo è quindi quello di ottenere una risposta spettrale del quarto canale con un picco nelle vicinanze di $\lambda = 850 \text{ nm}$; in questo modo il dispositivo avrà la massima sensibilità alla lunghezza d'onda desiderata e si otterrà il massimo rapporto segnale rumore.

2.3.4 Scelta dell'ottimo

Per ottenere una simulazione che rispettasse tutti i criteri di merito appena esposti e considerando delle ragionevoli profondità di assorbimento dei canali del TFD, sono state iterate diverse simulazioni variando i parametri geometrici di raccolta $X_B = [0.5 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}]$, $X_G = [1.2 \mu\text{m} - 1.8 \mu\text{m}]$, $X_R = [1.8 \mu\text{m} - 3.6 \mu\text{m}]$ e il massimo spessore del dispositivo $X_{\text{NIR}} = [3.6 \mu\text{m} - 8 \mu\text{m}]$.

I parametri di merito tenuti in considerazione sono stati l'errore di ricostruzione del colore (ΔE_{ab}), il modulo del minore coefficiente negativo presenti nelle matrici di conversione CCM e M_{NIR} , e l'efficienza quantica della risposta spettrale NIR @ 850 nm. Operando un

CAPITOLO 2

compromesso tra questi 3 parametri di merito sono stati ottenuti i seguenti risultati: $X_B = 0.5 \mu\text{m}$, $X_G = 1.4 \mu\text{m}$, $X_R = 2.2 \mu\text{m}$, $X_{NIR} = 4.5 \mu\text{m}$.

Le matrici di trasformazione ottenute sono;

$$M_{NIR} = \begin{bmatrix} 1.015 & -0.022 & 0.298 & -0.231 \\ 0.079 & 0.885 & 0.383 & -0.970 \\ 0.053 & -0.074 & 1.800 & -0.500 \end{bmatrix}, \quad M_{CCM} = \begin{bmatrix} 8.495 & -2.210 & 2.352 \\ 0.582 & 1.284 & -1.332 \\ -0.006 & -0.715 & 2.126 \end{bmatrix}$$

Si può osservare che i massimi coefficienti negativi sono rispettivamente -0.97 e -2.21, perciò la propagazione del rumore non è peggiorata dall'algoritmo di correzione del crosstalk. L'errore medio di ricostruzione nello spazio $L^*a^*b^*$ per i 24 campioni della Macbeth è pari a $\Delta E_{a^*b^*} \approx 3.8$, mentre alla lunghezza d'onda di 850 nm (quella della luce strutturata), la sensibilità del canale infrarosso (#4) è ancora maggiore del 30% del picco come mostrato in figura 36.

CAPITOLO 2

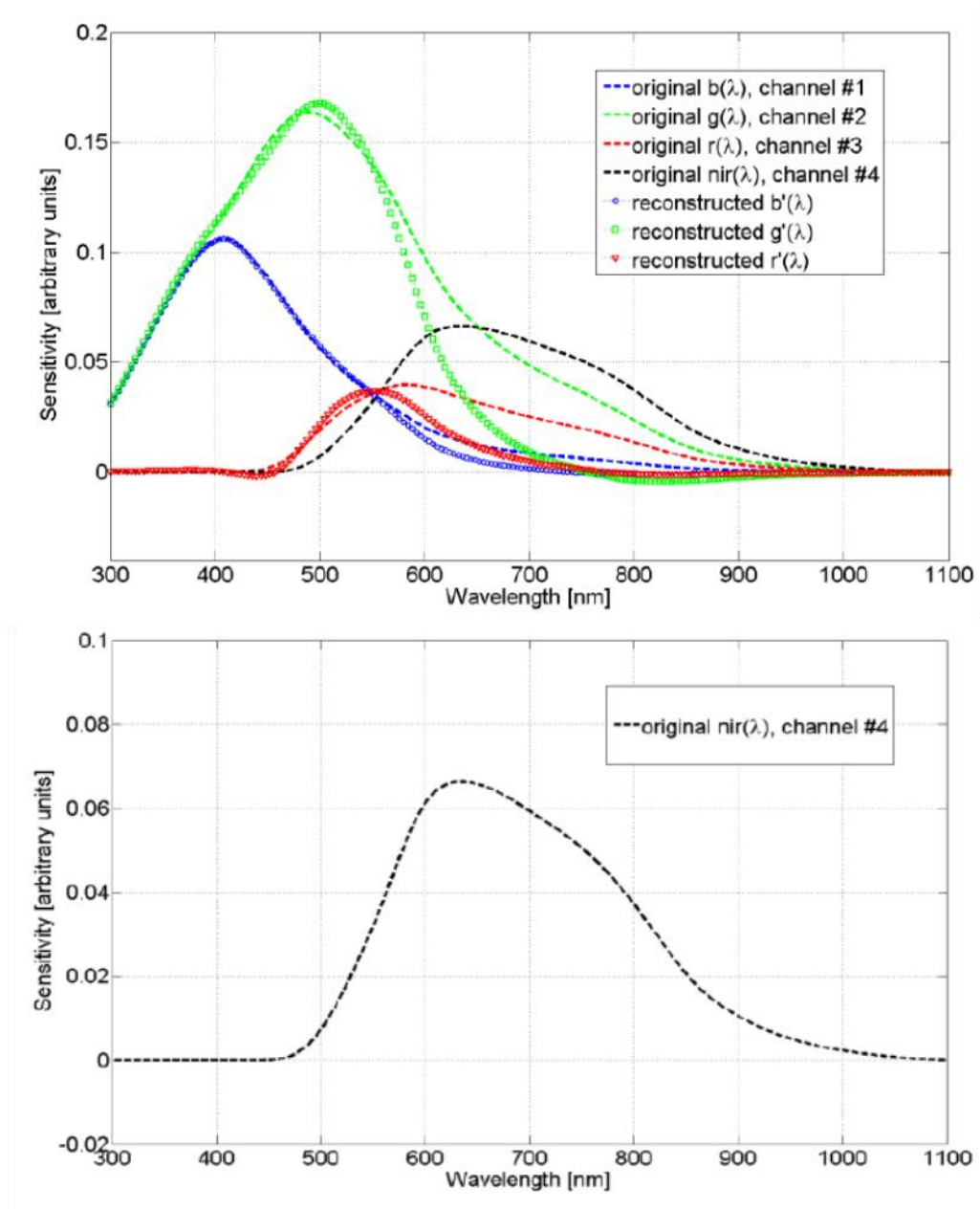


Figura 36 - (Sopra) Sono riportate le risposte spettrali ottime ottenute tramite iterazione mediante Matlab. Sono mostrate sia le risposte originali del dispositivo, sia quelle ricostruite tramite la trasformazione operata da M_{NIR} . (Sotto) E' riportata la risposta spettrale del canale infrarosso.

In questo capitolo tramite il simulatore di dispositivi a semiconduttori Dessis, si è cercato di riprodurre un dispositivo con delle caratteristiche simili a quelle simulate tramite Matlab nel capitolo precedente. Ottenuta la geometria migliore tramite la valutazione delle risposte spettrali, si è passato al layout del dispositivo tramite Cadence.

3 Descrizione tecnologia e implementazione della tecnologia in Dessis

Questo è stato il primo run del TFD in cui si è utilizzata la tecnologia LF150 che è un processo modulare RF CMOS a 150 nm.; questo processo permette di utilizzare 6 livelli di metallizzazioni di Al⁺, una passivazione di poliammide obbligatoria e uno strato epitassiale di 3 μm drogato P (circa $1.6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Al momento del design non erano disponibili funzionalità ottiche come microlenti o strati antiriflesso, seppur previsto in futuro.

Per simulare il comportamento del dispositivo è stato utilizzato il software Dessis (Device Simulator for Smart Integrated Systems); Dessis è un simulatore di conduzione elettrica e termica per dispositivi semiconduttori che permette di fare simulazioni fino a 3 dimensioni; il software incorpora già al suo interno diversi metodi di risoluzione numerica, modelli fisici e librerie contenenti le proprietà fisiche di vari semiconduttori. E' stato necessario trasportare in Dessis solamente i profili dei drogaggi reali della tecnologia LF150 fornita dalla Foundry. Per il design del TFD è stato necessario implementare i profili dei drogaggi delle zone drogate N⁺ P⁺ NWell e PWell. I drogaggi reali non hanno la forma di nessuna funzione elementare e sono stati approssimati tramite la sovrapposizione di diverse gaussiane come mostrato in figura 38.

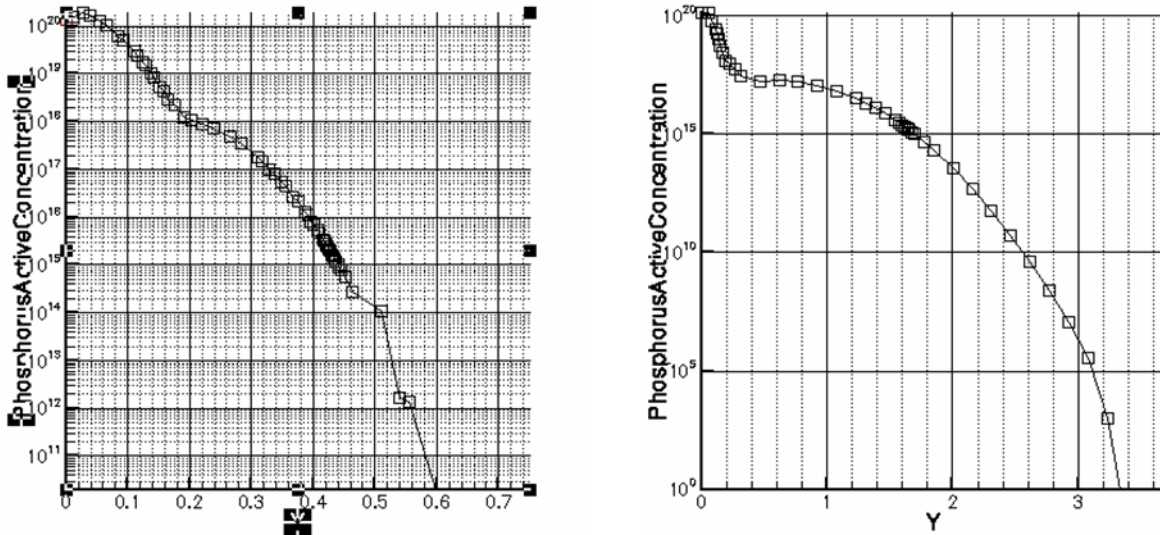


Figura 37 - (Sinistra) Profilo di drogaggio, N⁺, ortogonale alla superficie, implementato in Dessis. (Destra) Profilo della combinazione dei drogaggi NWell ed N⁺ implementato in Dessis. Entrambe le figure mostrano sulle ordinate la concentrazione [cm⁻³] di atomi droganti di fosforo, mentre sulle ascisse è riportata la profondità del dispositivo a partire dalla superficie [μm].

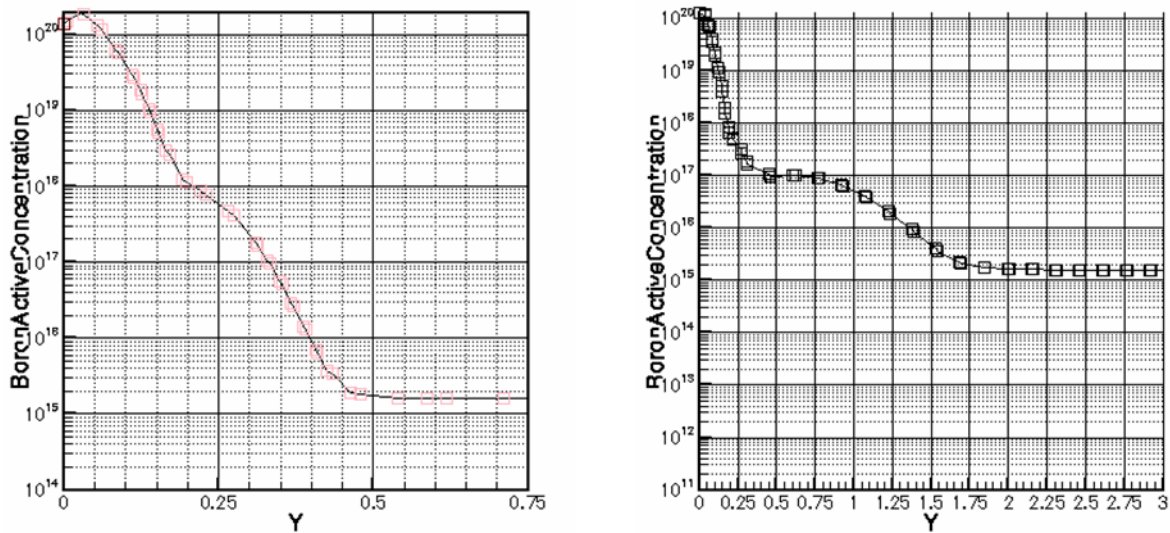


Figura 38 - (Sinistra) Profilo della combinazione dei drogaggi, P+ e strato epitassiale, ortogonale alla superficie, implementato in Dessis. (Destra) Profilo della combinazione dei drogaggi PWell, P+ e strato epitassiale implementato in Dessis. Entrambe le figure mostrano sulle ordinate la concentrazione [cm⁻³] di atomi droganti di Boro, mentre sulle ascisse è riportata la profondità del dispositivo a partire dalla superficie [μm].

3.1 Simulazioni preliminari

Sono state fatte delle simulazioni preliminari per valutare le correnti di punch through ed effetti di breakdown e tunneling; queste simulazioni sono servite a studiare le tensioni massime applicabili agli anodi del dispositivo prima di incorrere in effetti indesiderati che impedirebbero il corretto funzionamento del dispositivo. Le tensioni positive applicate agli anodi sono quelle necessarie alla polarizzazione del dispositivo, e generano i necessari campi elettrici trasversali alla raccolta delle cariche elettriche. La prima struttura analizzata, rappresentata in figura 39, per semplicità è solo una porzione del dispositivo, ma è la struttura base che si ripete simmetricamente in tutto il pixel. Questa struttura è composta da due zone drogate n^+ , separate da due STI (Shallow Trench Isolation) e una zona p^+ ; lo strato epitassiale è quello della tecnologia LF150 drogato p (circa $1.6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), e i profili dei drogaggi sono quelli implementati precedentemente che si avvicinano il più possibile a quelli reali forniti dalla foundry. La simulazione ha valutato la massima tensione applicabile all'anodo N2, mantenendo l'anodo N1 ad una tensione fissa di 1.5 V e il substrato e il drogaggio P a 0 V, prima di incorrere in correnti parassite non volute; questa è una condizione coerente per il TFD, poiché deve sempre avere gli anodi polarizzati a tensioni crescenti. Il fenomeno di break down, tunneling o punch-through tra due contatti, innesca una grossa corrente tra questi, che può portare alla saturazione di tutto il sistema di misura, e all'impossibilità di misurare il segnale utile generato dalla luce; per questo motivo bisogna porre molta attenzione a questi tipo di fenomeni. Per comprendere i limiti ottenibili da questa tecnologia sono state utilizzate le dimensioni minime permesse da questa: le zone p^+ e n^+ sono larghe 200 nm, mentre le STI sono larghe 150 nm.

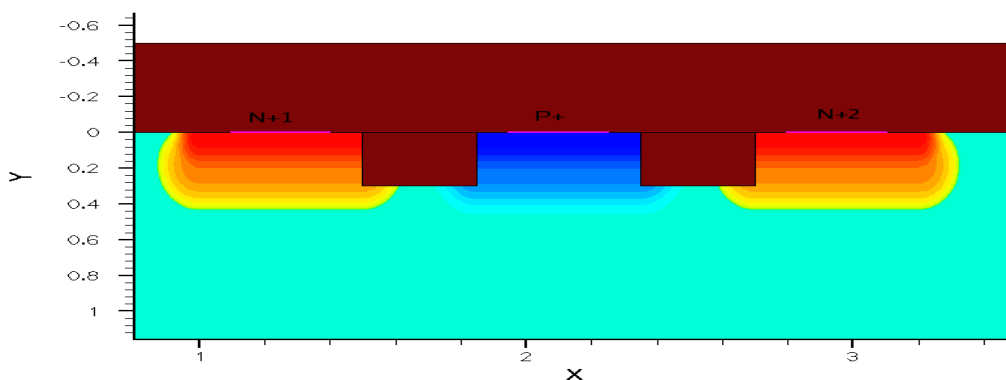


Figura 39 - Sezione trasversale del TFD a dimensioni minime permesse dalla tecnologia simulato tramite Dessis. Le dimensioni sugli assi sono espresse in micrometri.

I risultati ottenuti mediante queste prime simulazioni, sono che l'effetto dominante in questo tipo di struttura è quello di breakdown, e che la massima tensione applicabile agli anodi prima che si scateni una corrente di breakdown è di circa 17 V.

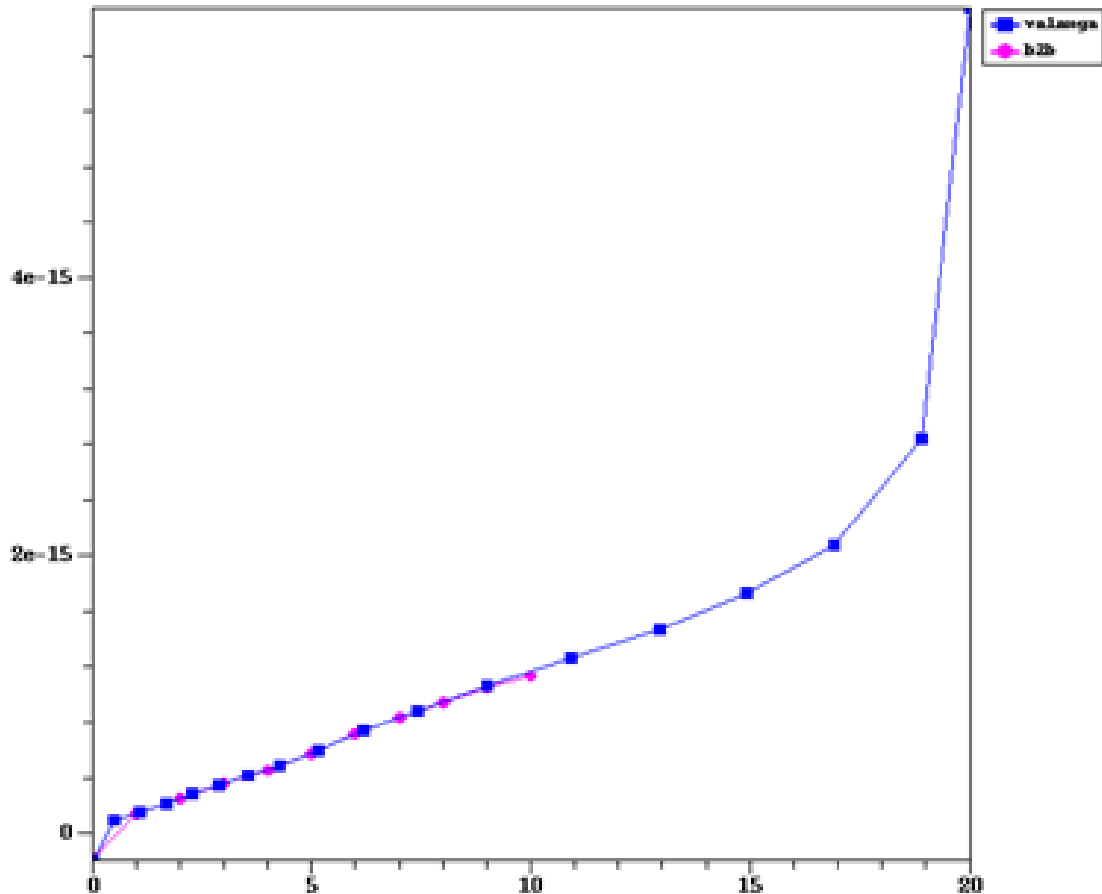


Figura 40 - Grafico che rappresenta in ordinata la corrente [A] tra i contatti, mentre in ascissa mostra la tensione [V] al contatto N2.

3.2 Struttura TFD

Come discusso in precedenza, la struttura del TFD può essere di due tipi, asimmetrica e simmetrica. Nella tecnologia LF150, rispettando le regole di layout, una struttura simmetrica per un pixel in grado di acquisire quattro diverse risposte spettrali avrebbe bisogno di 9 contatti N+ separati da 8 contatti P+ e 12 STI; per questo motivo un pixel simmetrico nell'attuale tecnologia LF150 non potrebbe essere meno largo di circa $9 \mu m$. Una tecnologia più scalata

CAPITOLO 3

permetterebbe di ridurre le dimensioni del dispositivo e magari implementarlo con una struttura simmetrica.

A causa dell'ingombro del singolo pixel è stato scelto di utilizzare una struttura asimmetrica del dispositivo che è larga poco più di $6 \mu m$.

La figura 41 rappresenta una cross section del dispositivo asimmetrico in 2 dimensioni implementata in Dessis; per semplicità di simulazione in Dessis, il dispositivo è stato simulato solamente in 2 dimensioni, poiché il comportamento fisico descritto precedentemente non cambia trascurando la dimensione z , se vengono rispettati certi accorgimenti in fase di layout; inoltre il tempo necessario per simulare il comportamento del dispositivo in 2 dimensioni è parecchio minore rispetto alle 3 dimensioni, permettendo così di ottenere un maggior numero di simulazioni. Per escludere la possibilità di comportamenti imprevisti e non simulati del dispositivo reale ai bordi della dimensione z , nella successiva fase di layout il pixel avrà una dimensione z molto maggiore della sua larghezza nella dimensione x .

A causa della simmetria dei pixel e della loro identica polarizzazione, per semplicità computazionale del simulatore, in Dessis è stato implementato per le simulazioni un solo Pixel, che in fase di layout finale verrà semplicemente affiancato da pixel identici; in questo modo la Pwell di un pixel sarà affiancata alla Nwell del pixel adiacente, impedendo così che la polarizzazione di un pixel interferisca con quello vicino.

I contatti #0 #1 #2 #3 sono quelli che polarizzati a tensioni crescenti maggiori di $0 V$ generano il campo elettrico trasversale necessario al funzionamento del dispositivo. Tutte le zone P⁺, Pwell e il substrato sono sempre tenute ad una tensione fissa di $0 V$; queste zone servono a isolare gli anodi N⁺ tra loro, ciò avviene tramite la polarizzazione inversa tra le giunzioni P⁺N⁺ che vengono a formarsi.

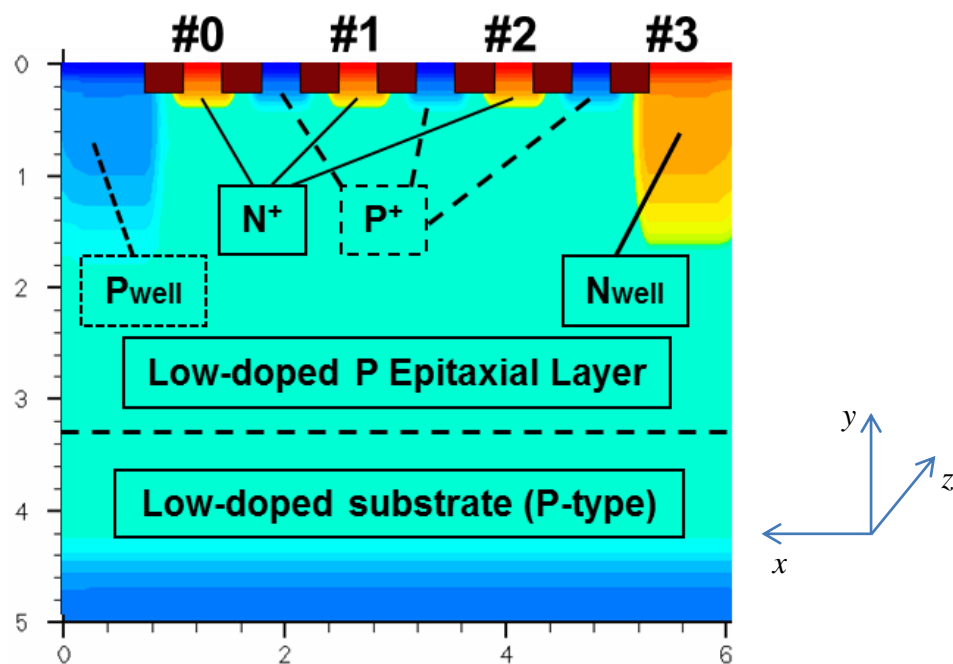


Figura 41 - Sezione rappresentativa del pixel TFD a 4 canali asimmetrico implementato in Dessis.

Tutti i drogaggi P⁺ N⁺ Pwell ed Nwell sono implementati utilizzando i profili della tecnologia LF150; per una corretta simulazione bisognerebbe conoscere i profili dei drogaggi sia dello strato epitassiale, sia del substrato; quello dello strato epitassiale è fornito nelle specifiche della tecnologia, invece non si hanno informazioni riguardanti la caratterizzazione del drogaggio del substrato. Sulla base delle risposte ottiche dell'efficienza quantica fornite da Lfoundry, è stato calcolato un epitassiale equivalente delle dimensioni di circa 20 μm . Per questo motivo nelle simulazioni Matlab è stata utilizzata una profondità di raccolta di 4.5 μm , sufficiente alla raccolta di tutta la radiazione visibile e Nir.

Una particolarità del dispositivo non evidente in figura 41 sono le metallizzazioni sovrastanti il pixel; le metallizzazioni, sono totalmente riflettenti alle lunghezze d'onda che vengono utilizzate, oltre ad essere sfruttate come contatti, sono utilizzate per permettere alla luce di raggiungere solamente la regione del pixel dove i campi elettrici sono generati correttamente; nelle simulazioni questo indirizzamento della luce non è rappresentato con delle effettive metallizzazioni, ma per semplicità vengono illuminate solamente le zone interessate, ipotizzando che le metallizzazioni nella realtà impediscano alla luce incidente di illuminare il resto del dispositivo. Questa illuminazione selettiva del dispositivo è anche detta finestratura.

CAPITOLO 3

Questo tipo di illuminazione è necessaria, poiché come spiegato precedentemente, per ottimizzare il principio di funzionamento del TFD, la luce deve essere indirizzata verso un'area parziale del dispositivo. Il corretto principio di funzionamento si basa sulla raccolta da parte di ognuno dei 4 anodi, delle cariche generate a differenti profondità; per questo motivo, tramite la finestratura, si cerca di indirizzare la luce laddove i campi elettrici sono più trasversali, cioè dove è più netta la distinzione di raccolta tra i diversi anodi; se vengono illuminate zone dove non è netta la separazione delle differenti profondità di raccolta degli anodi, le risposte spettrali dei 4 canali tenderanno ad avere un overlap sempre maggiore; come discusso nel paragrafo 2.3.2, un overlap tra le risposte spettrali, riduce l'accuratezza di riproduzione del colore, ma soprattutto incrementa i coefficienti negativi della matrice di conversione CCM; e come spiegato, all'aumentare dei coefficienti negativi della matrice di conversione, peggiora il rapporto tra segnale e rumore del sistema. Per questo motivo è necessario operare una finestratura della luce incidente il dispositivo, anche a costo di diminuire il Fill Factor.

Diversamente dalle simulazioni fatte in Matlab, dove i parametri di progetto erano solamente la profondità di raccolta dei diversi anodi, nelle simulazioni Dessis, utilizzando le dimensioni minime permesse dalla tecnologia LF150, i criteri di progetto sono solamente due: la tensione di polarizzazione degli anodi e la finestratura.

Le simulazioni si dividono in 3 fasi; la prima fase riguarda la polarizzazione del dispositivo, e quindi il criterio di progetto sono le tensioni da applicare ai diversi anodi del dispositivo per ottenere il campo elettrico trasversale. La seconda fase riguarda l'illuminazione del dispositivo polarizzato precedentemente, in questa fase viene scelta la finestratura, e di conseguenza le zone da illuminare; in questa seconda fase si ottengono le risposte spettrali del dispositivo illuminato. La terza fase riguarda la valutazione della qualità delle risposte spettrali ottenute al punto precedente, e differentemente dalle altre 2, viene effettuata tramite Matlab. L'ottimizzazione avviene iterando le tre fasi; le successive ottimizzazioni vengono decise valutando la qualità delle risposte spettrali secondo i fattori di merito discussi nel capitolo 2, in modo da ottenere qualitativamente gli stessi risultati.

3.2.1 Polarizzazione

La corretta polarizzazione è un processo fondamentale per ottenere la geometria dei campi elettrici necessaria al funzionamento del dispositivo. In figura 42 si possono vedere evidenziate nel dispositivo le linee di forza del campo elettrico; i colori associati alle linee di forza stanno ad indicare a quale dei 4 anodi sono dirette, e rispettivamente le linee blu portano all'anodo #1, le linee azzurre all'anodo #2, le linee verdi all'anodo #3 e le linee rosse all'anodo #4. I cerchi colorati invece rappresentano delle ipotetiche cariche generate dalla luce incidente, questi sono posizionati al di sotto dell'anodo #1 per mostrare che in quella regione verticale, a differenti profondità, corrispondono linee di forza di tutti e 4 gli anodi. Questa regione spaziale al di sotto dell'anodo #1, è quindi la più adatta ad essere illuminata, perché ad ogni anodo corrisponde una profondità di raccolta distinta e differente dagli altri.

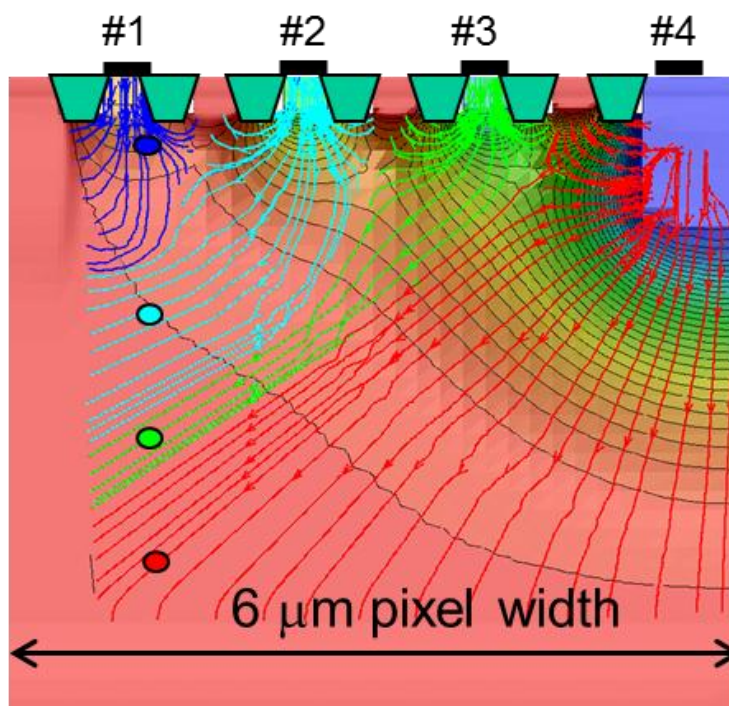


Figura 42 - Sezione del TFD simulato tramite Dessis. Sono messe in evidenza le linee di forza del campo elettrico.

Le polarizzazioni iniziali hanno avuto l'obiettivo preliminare di ottenere una profondità di raccolta di ogni anodo simile a quelle ottenute tramite le simulazioni Matlab, discusse nel paragrafo 2.3.4. Non è sufficiente ottenere delle profondità di raccolta simili a quelle ottimali

CAPITOLO 3

simulate in Matlab, è necessario anche analizzare la qualità delle risposte spettrali ottenute e controllare la loro qualità in termini di accuratezza di ricostruzione del colore, e propagazione di rumore elettronico; l'obiettivo successivo è quindi quello di implementare nel dispositivo simulato in Dessis delle risposte spettrali qualitativamente simili a quelle simulate in Matlab. Durante la simulazione della polarizzazione degli anodi del TFD è vincolante che non ci siano fenomeni di punch through tra i contatti del dispositivo; durante questa fase di simulazione le massime tensioni applicabili ai diversi anodi sono vincolate dalla presenza del punch through; è facile accorgersi della presenza di queste correnti parassite durante le simulazioni, perché quando si verificano, la corrente di uno degli anodi cambia di segno.

Durante le simulazioni in Dessis il passo successivo alla polarizzazione è quello della misura della luce assorbita, mediante la quale si ottengono le risposte spettrali del dispositivo.

3.2.2 Finestratura

In questa seconda fase viene decisa la dimensione e la posizione della finestratura; in Dessis questa scelta viene fatta decidendo quali porzioni di dispositivo illuminare. In Dessis il dispositivo è simulato in 2 dimensioni, tramite una rappresentazione del dispositivo in sezione verticale come si vede in figura 42 ; la finestratura, ossia la regione del dispositivo che viene illuminata, nel dispositivo a 2 dimensioni è rappresentata dalla porzione a colori della figura 43. La simulazione Dessis dell'illuminazione del dispositivo avviene nel seguente modo: per prima cosa viene decisa la "finestratura", ossia la regione del dispositivo illuminata; successivamente, per calcolare le risposte spettrali, si simula un fascio di luce che contiene luce ad una sola lunghezza d'onda, incidente verticalmente sul dispositivo. Le lunghezze d'onda scelte per la simulazione sono quelle tra i 400 e i 1100 nm, con step di 25 nm. Per ogni lunghezza d'onda della luce monocromatica scelta vengono misurate le correnti che scorrono nei diversi anodi; queste correnti sono la conseguenza delle cariche generate dall'assorbimento della luce, le quali attratte dal campo elettrico transitano negli anodi attratte dalla tensione positiva, generando così una corrente di segnale.

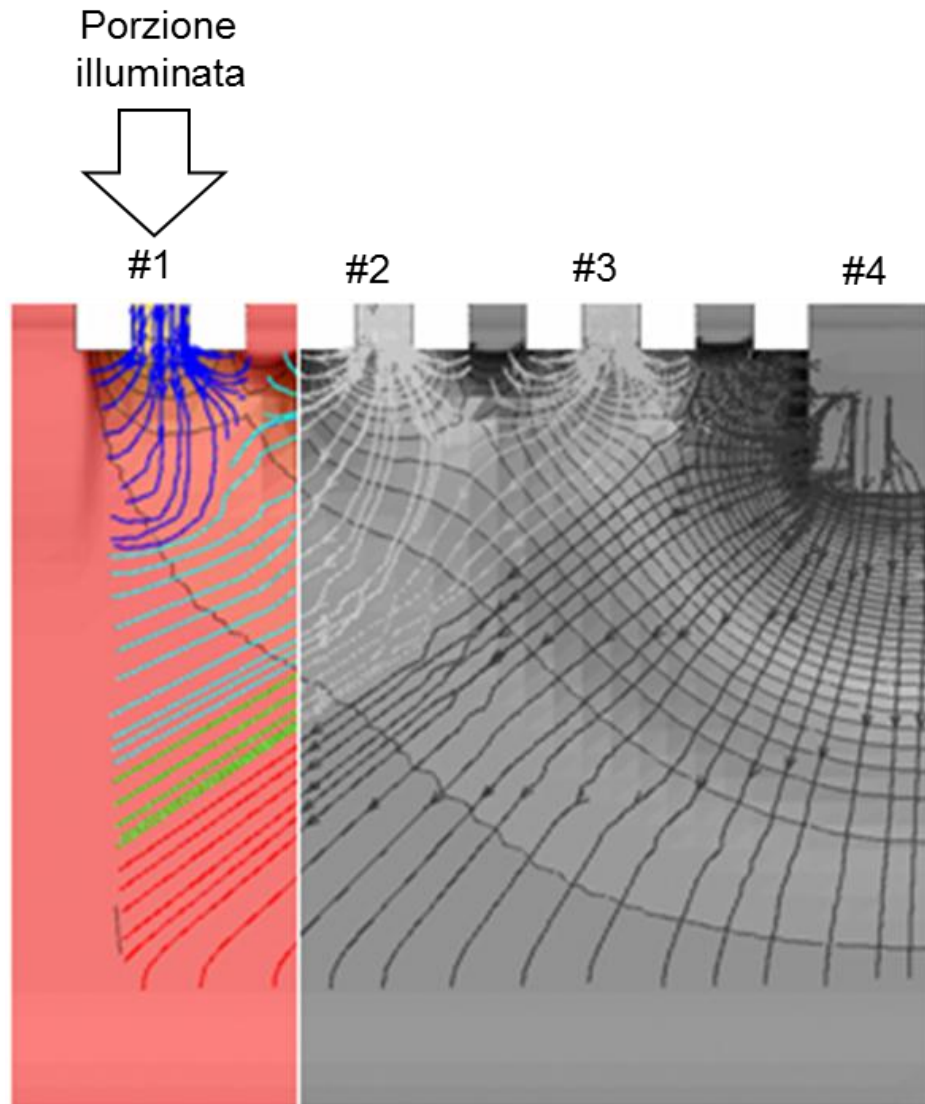


Figura 43 - Sezione del dispositivo mostrato in figura 42, con evidenziata la zona illuminata tramite la finestratura.

Da queste simulazioni si ottengono le risposte spettrali assolute di ogni anodo ad ogni lunghezza d'onda considerata; queste sono rappresentate dalle correnti risultanti ad ogni lunghezza d'onda ad ognuno dei 4 anodi. La figura 44 mostra le 4 correnti ottenute durante la simulazione dai 4 anodi del dispositivo. La funzione Blu è la corrente misurata dall'anodo #1, la verde dall'anodo #2, la rossa dall'anodo #3 e la nera dall'anodo #4; si notano i picchi delle fotocorrenti blu, verde, rossa e Nir, rispettivamente a 425 nm, 530 nm, 670 nm e 780 nm.

CAPITOLO 3

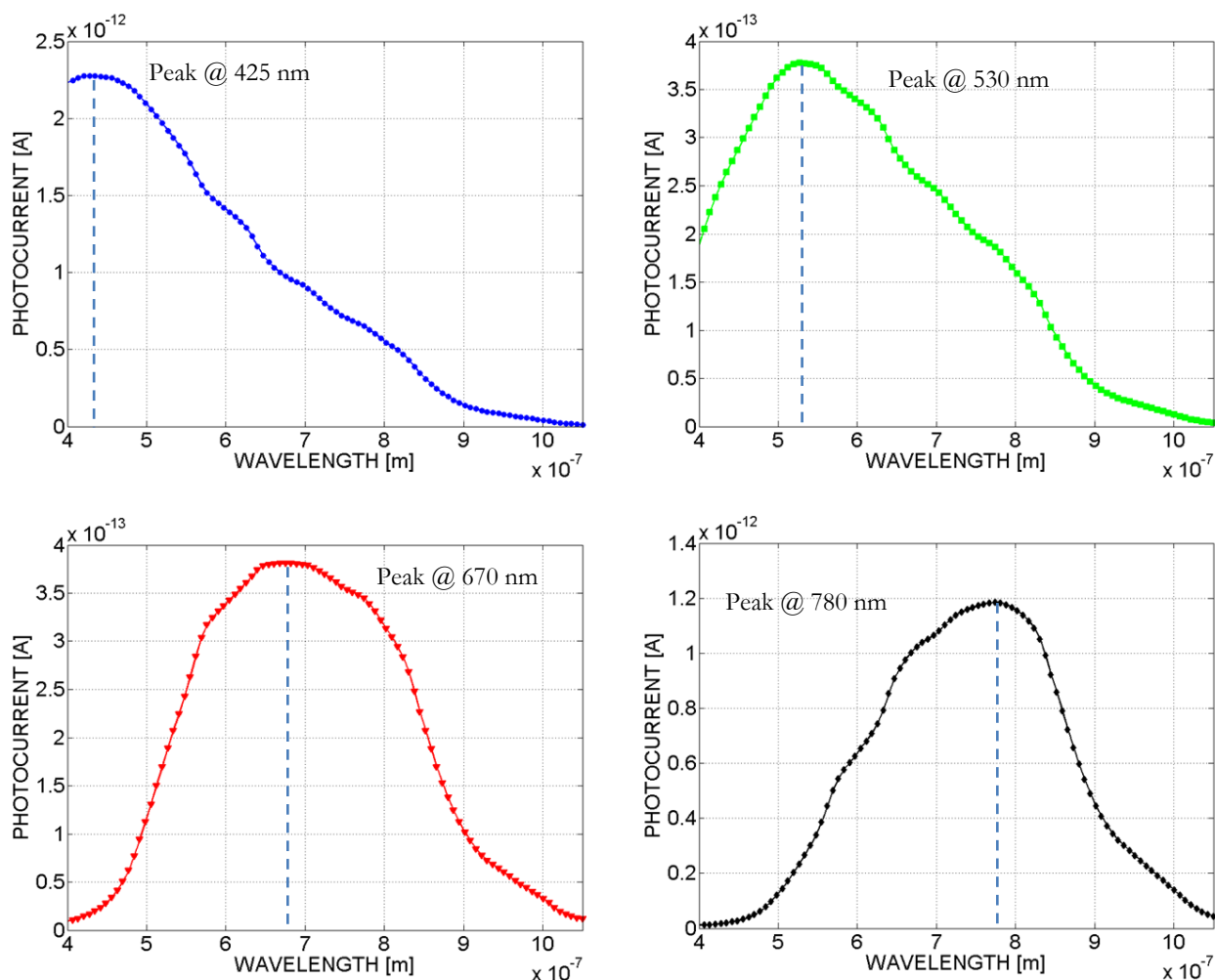


Figura 44 - Risposte spettrali assolute espresse in corrente misurata agli anodi dei 4 canali del dispositivo nello spettro compreso tra i 400 nm e i 1100 nm. Le risposte rappresentate sono una interpolazione di quelle ottenute da Dessis tramite Matlab.

In questa fase di scelta della finestratura è interessante notare il trade-off tra la larghezza della finestra illuminante e le caratteristiche delle risposte spettrali. Una finestratura più larga migliora il Fill Factor (rapporto tra area illuminata e area del pixel), ma peggiora le risposte spettrali rendendole sempre più simili e avvicinando i picchi delle diverse risposte. Come spiegato nel cap 2, le risposte spettrali troppo simili, e quindi correlate tra loro, provocano un errore di ricostruzione sistematico maggiore; questo errore comporta un errore ΔE_{ab} maggiore, ma anche dei coefficienti negativi nella matrice di conversione che peggiorano la propagazione dell'errore elettronico.

3.2.3 Valutazione Risposte Spettrali e iterazione per la scelta dell'ottimo

Le risposte ottenute dalla simulazione in Dessis vengono confrontate con le risposte ottenute dalla simulazione Matlab, e valutate nel complesso con gli stessi criteri di merito considerati e descritti nel paragrafo 2.3.4. Se le risposte spettrali non rispettano i criteri di merito voluti vengono reiterate in ordine le 3 fasi di simulazione: geometria del dispositivo, polarizzazione degli anodi e finestratura dell'illuminazione, fino a quando non si ottengono delle risposte i cui parametri di valutazione siano qualitativamente in linea con i migliori risultati ottenibili dalle simulazioni Matlab.

Data la complicatezza della geometria del campo elettrico che si genera all'interno del dispositivo, non è facile decidere quali parametri delle 3 fasi di simulazione modificare per migliorare la qualità delle risposte spettrali del dispositivo. Ogni modifica operata ad ogni fase si ripercuote nella catena di simulazione, a volte con risultati difficilmente prevedibili. Per questo motivo per ottenere l'ottimo che più si avvicinasse a quello simulato in Matlab, sono state necessarie numerose simulazioni.

I parametri variati durante queste simulazioni sono stati:

- La posizione della finestratura.
- La dimensione della finestratura.
- La tensione ai contatti #1 #2 #3 #4
- La dimensione dell'STI compresa tra il contatto #1 e il contatto p+

La posizione della finestratura durante le simulazioni è stata sovrapposta principalmente all'anodo #1, laddove le linee di forza del campo elettrico sono più ortogonali alla luce incidente. La dimensione della finestra di illuminazione è stata variata tra una dimensione minima di 600 nm, fino ad una dimensione massima di 2 μm . Le tensioni ai contatti del dispositivo sono state fatte variare in modo da non superare mai una differenza di potenziale tra due contatti superiore ai 17 Volt, così da non incorrere in fenomeni di correnti parassite. La dimensione dell'STI compreso tra il contatto #1 e il contatto adiacente con drogaggio P⁺, è stata variata tra un range di dimensioni comprese tra i 480 nm e 1 μm .

3.2.4 Struttura Ottima

La struttura ottima è stata scelta secondo i criteri di riferimento esposti nel capitolo 2.3.4. Tramite diverse iterazioni è stato raggiunto il risultato che più si avvicina alle specifiche ottenute tramite le simulazioni operate con Matlab; la geometria del dispositivo così ottenuto è quella della figura 45.

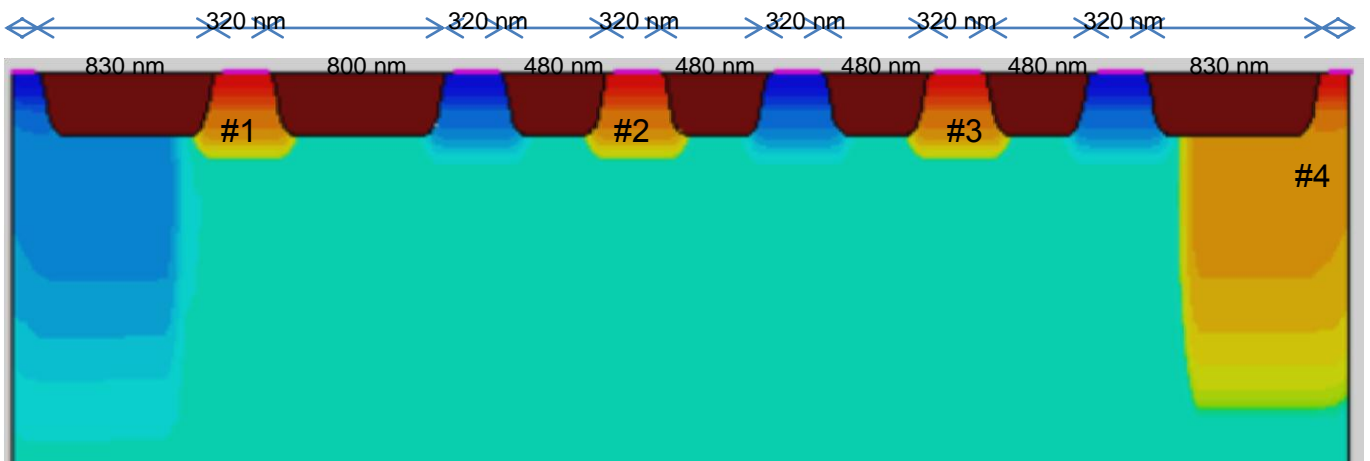


Figura 45 - Sezione della geometria del dispositivo finale. In alto sono riportate le dimensioni dei diversi anodi e STI.

E' interessante notare come la struttura sia asimmetrica, infatti la STI presente tra l'anodo #1 e #2 è stata allargata a 800nm; questa modifica è stata fatta per sfruttare la regione di spazio sottostante, dove le linee di campo hanno pendenza maggiore, ed è più netta la zona di raccolta dei diversi anodi del dispositivo

Le risposte spettrali del dispositivo con questa geometria sono mostrate in figura 46. Le tensioni di polarizzazione degli anodi utilizzate sono #1= 0.5 V, #2= 1 V, #3= 15 V, #4= 15 V. Le risposte sono espresse sotto forma di filtri equivalenti, ossia ogni risposta assoluta è normalizzata alla somma di tutte le risposte assolute dei 4 anodi, come mostrato nella formula

CAPITOLO 3

3.1; in questo modo si ottengono delle risposte spettrali indipendenti dall'illuminazione e dalla tecnologia utilizzata. L'anodo #1 corrisponde al blu, il #2 al verde, il #3 al rosso e il #4 al Nir.

$$FE_j(\lambda) = \frac{i_j(\lambda)}{i_w(\lambda)} \sim \frac{i_j(\lambda)}{\sum_{j=1}^4 i_j(i_j(\lambda))} \quad 3.1$$

FE_j rappresenta il filtro equivalente ad una lunghezza d'onda di uno dei 4 canali: blu, verde, rosso e Nir; i_j è la corrente assoluta ottenuta da uno dei 4 canali del dispositivo, mentre i_w è la corrente totale che verrebbe generata da un fotodiodo illuminato tra i 400 e 1100 nm; i_w è perciò approssimabile con la somma delle quattro correnti assolute ottenute dai 4 canali del TFD.

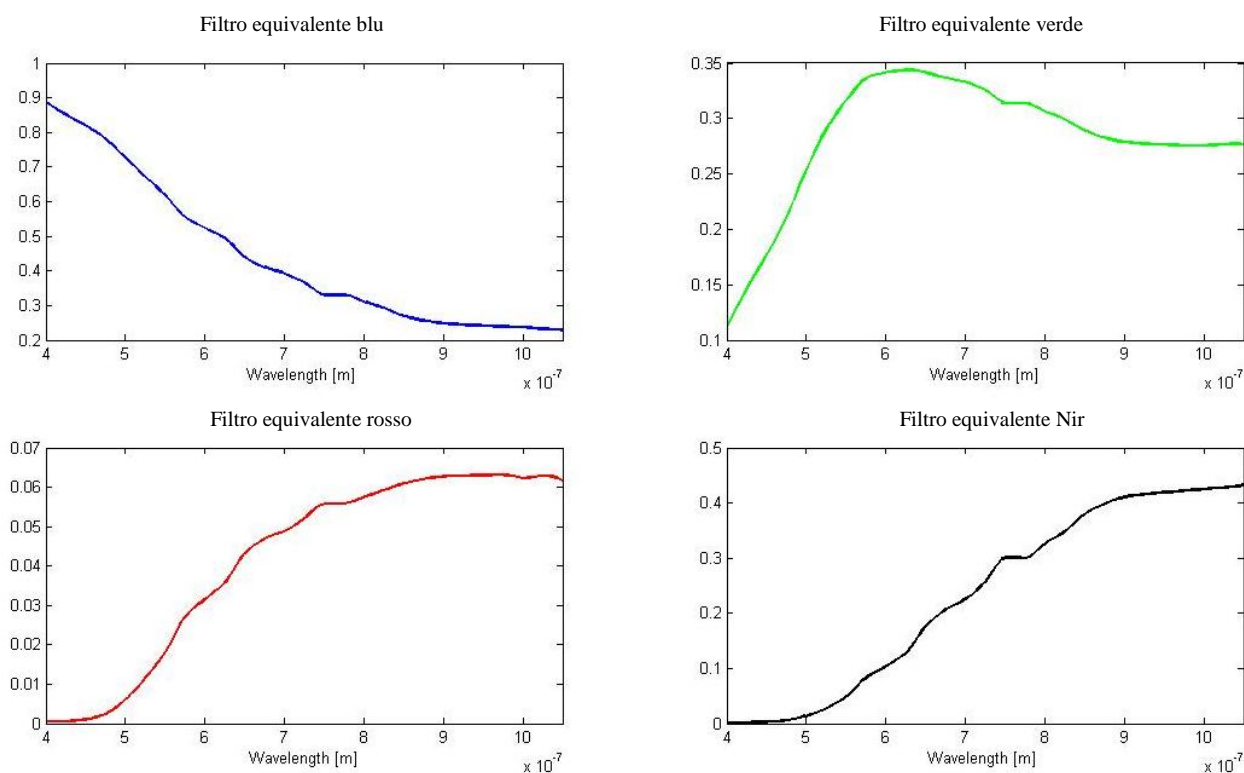


Figura 46 - Filtri equivalenti simulati del TFD a 4 canali con la struttura ottima ricercata.

3.3 Layout

Una volta scelta la struttura ottima per la realizzazione del design è stato utilizzato il software Cadence Virtuoso, Cadence è un software che permette la simulazione e il design di sistemi elettronici. Nel caso di TFD passivi, siccome l'amplificazione del segnale avverrà off-chip, non è stata fatta alcuna simulazione analogica in questo passo del progetto, ma è stato solo implementato il design del dispositivo.

Questo run del TFD ha come scopo l'ottimizzazione del dispositivo per l'acquisizione della luce strutturata a 850 nm. Perciò il design di questo run ha come scopo la caratterizzazione del sensore TFD, e non di un sistema di acquisizione di immagini digitali completo che utilizzi come sensori il TFD; il progetto di un sistema di sensori sarà compito di un successivo run, quando sarà stato misurato e valutato il comportamento del dispositivo, compito di questo progetto di Tesi.

Siccome le misure interesseranno la caratterizzazione del sensore, per i motivi appena esposti, per aumentare il segnale misurabile è stato scelto in fase di design di progettare delle strutture in parallelo, poiché l'area occupata in questa fase di progetto non è un parametro di valutazione.

Le strutture in parallelo sono composte dallo stesso dispositivo ripetuto più volte, ma cortocircuitando tra loro le parti corrispondenti dei diversi dispositivi; così ad esempio, nella struttura in parallelo, gli anodi di tutti i dispositivi che corrispondono alla raccolta della radiazione più superficiale, che nelle simulazioni avevamo chiamato #1, saranno tutti connessi tra loro; in questo modo si ha il vantaggio di poter polarizzare tutti quanti gli anodi #1 dei dispositivi in parallelo con un solo bus, e di poter misurare tramite lo stesso bus la fotocorrente generata da tutti questi. Anche i contatti del dispositivo che vengono polarizzati alla stessa tensione, come tutti i contatti P presenti tra gli anodi, e il substrato, vengono per semplicità cortocircuitati tra loro e tra tutti i dispositivi della struttura parallelo; in questo modo tramite un solo bus è possibile polarizzare tutti i contatti p e il substrato di tutti quanti i dispositivi della struttura.

La struttura parallelo permette di ottenere un maggiore segnale misurabile, poichè da un singolo bus è possibile misurare le fotocorrenti generate da un determinato anodo di tutti quanti i

CAPITOLO 3

dispositivi in parallelo. In questo modo si cerca di migliorare il rapporto segnale rumore delle misure sperimentali successive.

La fase di design ha tenuto conto di tutte le regole di layout della tecnologia di Lfoundry, la quale però non offre alcuni processi che avrebbero potuto migliorare la qualità del dispositivo, come le microlenti che servono a focalizzare la luce sulla zona attiva del dispositivo, o degli strati antiriflesso, che aumentano la quantità di luce assorbita nel dispositivo.

Siccome tutte le simulazioni sono state eseguite in 2 dimensioni, per poter trascurare gli effetti di bordo nella dimensione \vec{z} , nel layout ne è stato tenuto conto progettando dei dispositivi aventi una dimensione \vec{z} molto maggiore della dimensione \vec{x} ; in figura 47 è mostrato il layout di un singolo sensore, di cui sono riportate le dimensioni complessive.

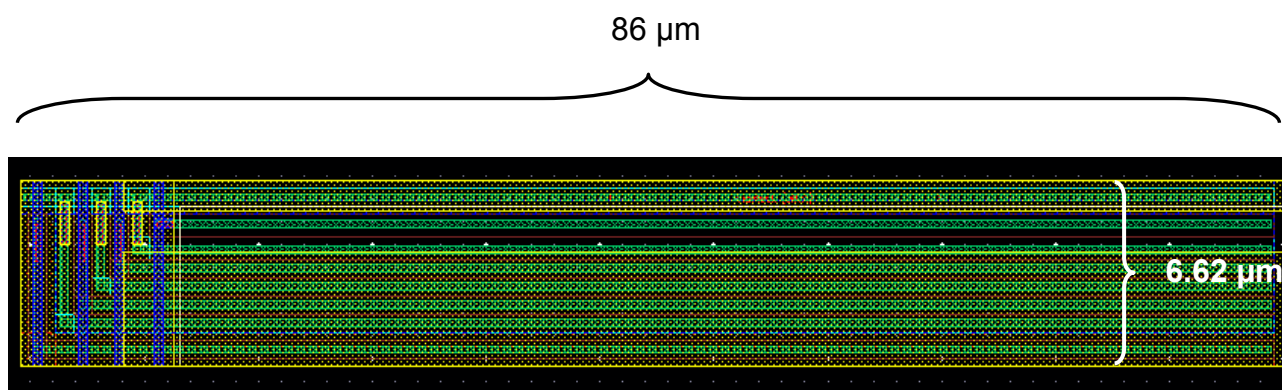
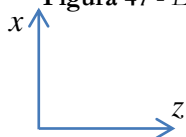


Figura 47 - Layout di un singolo Pixel con riportate le dimensioni. Le dimensioni nell'asse z sono quelle di un pixel intero, mentre in figura, per semplicità di rappresentazione, ne è stata troncata una parte.



La finestratura discussa precedentemente, necessaria per indirizzare la luce solo nella regione di dispositivo voluta, è realizzata tramite una metallizzazione. In figura 48, il layer giallo rappresenta il layer di metallizzazione più alto permesso dalla tecnologia Lfoundry, la luce verrà trasmessa nel dispositivo solamente nelle regioni dove questo layer è mancante, poichè questo layer è riflettente nella regione di spettro che misura il TFD. I layer rossi rappresentano le regioni N^+ ed N_{well} , le tracce blu invece sono le metallizzazioni di bus che connettono il dispositivo ai Pad che servono a collegarsi e interfacciarsi con l'elettronica off-chip.

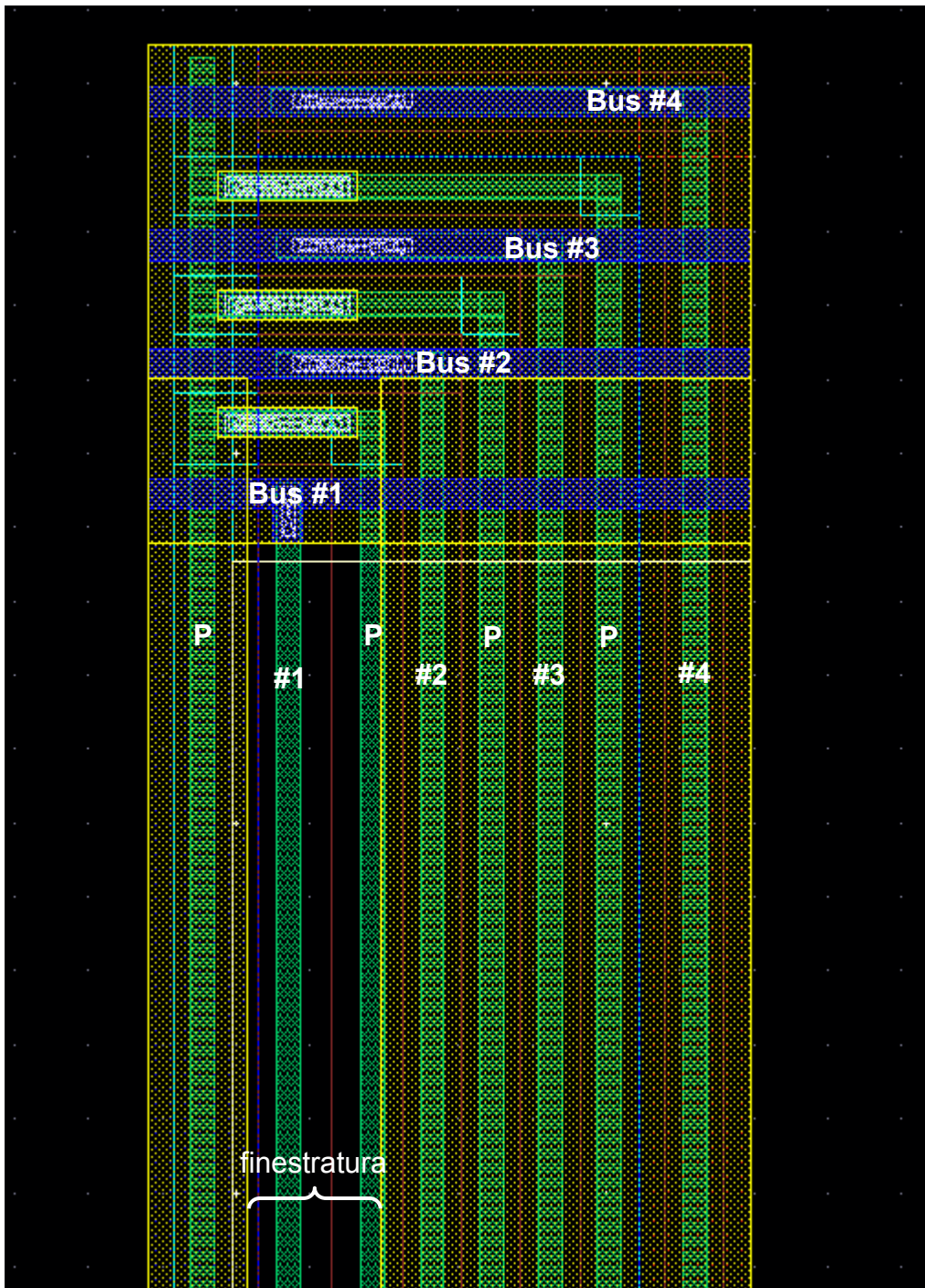


Figura 48 - Ingrandimento della porzione del pixel di figura 47 con evidenziati i nomi dei diversi contatti e delle linee di bus.

Le porzioni verdi della figura 48 sono i contatti dei diversi anodi e catodi i quali nelle simulazioni precedenti erano rappresentati dai contatti N^+ e P^+ . I contatti sono necessari per la polarizzazione del dispositivo e per la misura delle fotocorrenti; i contatti P, che sono sovrastanti le zone drogate P^+ e P_{well} , durante le simulazioni sono sempre stati tutti tenuti alla

CAPITOLO 3

stessa tensione, quindi sono stati tutti cortocircuitati tra loro; in questo modo sarà necessario un solo bus e un solo pad per la loro polarizzazione. Invece i contatti degli anodi, che nelle simulazioni precedenti rappresentavamo come #1 #2 #3 #4, hanno il compito di polarizzare e misurare distintamente la corrente ad ogni anodo, e perciò possiedono tutti una loro differente linea di bus.

Tramite la ripetizione affiancata e simmetrica di 24 dispositivi identici si ottiene la struttura in parallelo mostrata in figura 49. In questa fase si è fatta attenzione a connettere correttamente tra loro i bus degli anodi corrispondenti di ognuno dei sensori. Inoltre è stata aggiunta una linea di bus anche per i contatti P.

Siccome la luce viene assorbita dal chip anche in regioni esterne dal sensore, per isolare il sensore dalle cariche che vengono generate esternamente è stato aggiunto al sistema un Guard Ring. Il Guard Ring è rappresentato in figura 49 da un layer rosso che circonda tutto il dispositivo, ed è composto da una Nwell; la Nwell polarizzata con una tensione positiva serve a raccogliere tutte le cariche che vengono generate all'esterno del dispositivo. Il Guard Ring per potere attrarre le cariche libere generate nel resto del dispositivo deve essere polarizzato ad una tensione positiva; altrimenti una tensione di polarizzazione trascurabile rispetto a quella di anodi, non permetterebbe al guard ring di attrarre le cariche libere non generate all'interno del dispositivo.

In questo modo le cariche generate nella regione esterna al dispositivo vengono raccolte da Guard Ring e non disturbano la misura della fotocorrente agli anodi. La polarizzazione del Guard Ring potrebbe modificare la polarizzazione dei sensori adiacenti, per questo motivo la struttura parallelo esternamente è circondata da Pwell polarizzate a massa. Le Pwell vengono utilizzate nello stesso modo per cui vengono utilizzate nel sensore, ma anziché isolare un sensore dall'altro, in questo caso isolano i sensori esterni dal Guard Ring.

In seguito sono stati aggiunti al layout i pad che permettono di polarizzare tutti i contatti del dispositivo come mostrato in figura 50.

Tramite i contatti #1 #2 #3 e #4 vengono polarizzati distintamente gli anodi di ogni dispositivo; tutti i 24 dispositivi in parallelo hanno un unico contatto di polarizzazione per

CAPITOLO 3

ognuno dei 4 anodi, in questo modo tutti i dispositivi hanno la stessa polarizzazione, e la fotocorrente che viene misurata è quella complessiva di tutti i dispositivi in parallelo.

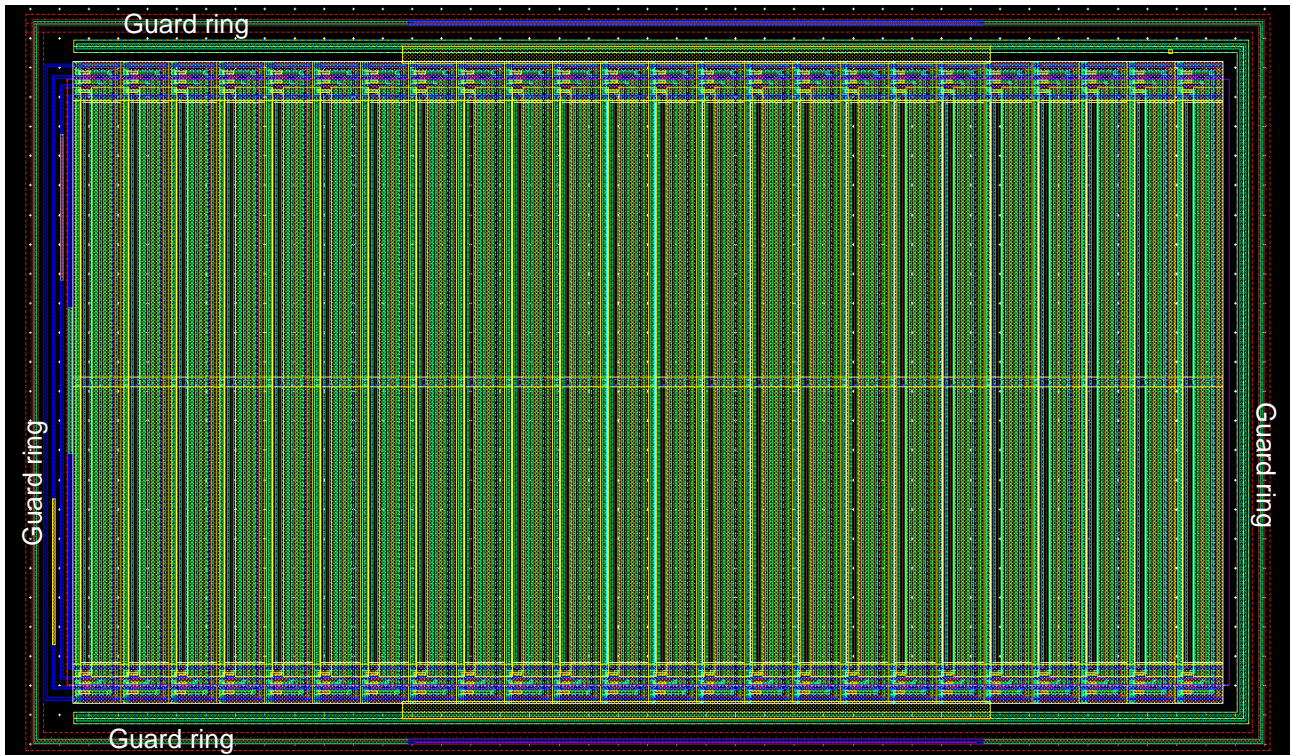


Figura 49 - *Layout del dispositivo intero composto da 24 pixel in parallelo, circondato dal Guard ring.*

I due ulteriori pad sono quelli del Guard Ring e quello che polarizza i contatti P; il Guard Ring è polarizzato indipendentemente dagli altri anodi ad una tensione maggiore di 0, in modo da attrarre gli elettroni esterni al pixel. Il contatto P è polarizzato a massa e connette tutti i contatti p di tutti i 24 dispositivi.

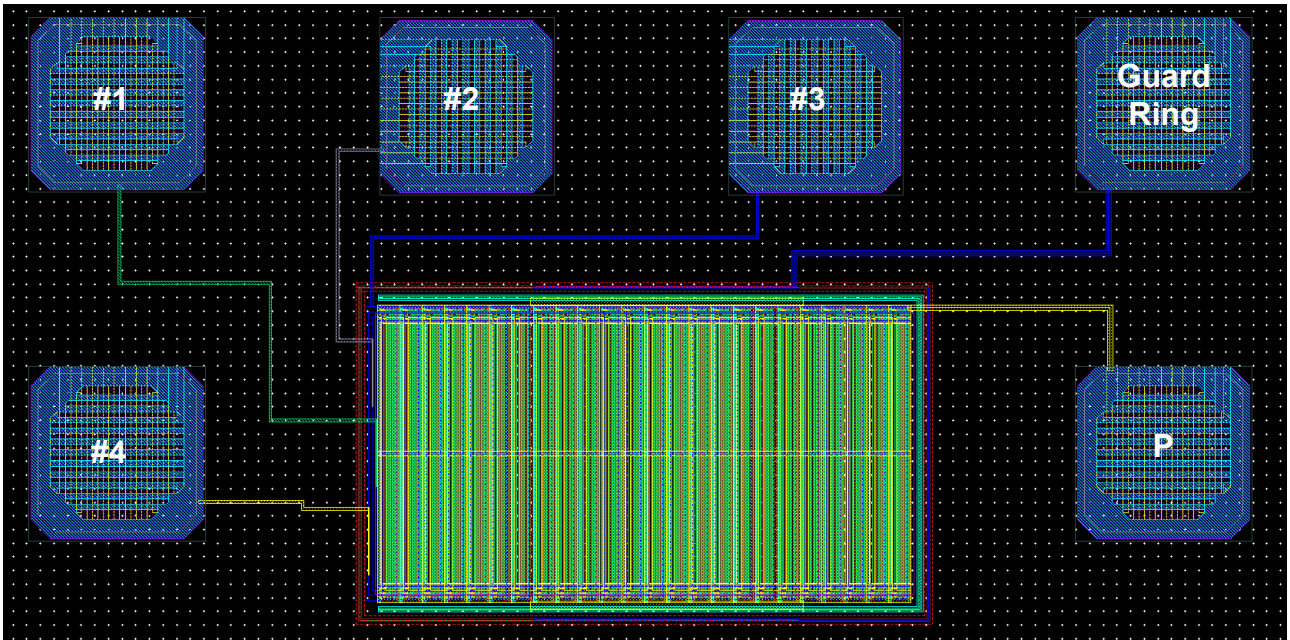


Figura 50 - Layout dell'intero dispositivo, comprensivo anche dei pad.

In questo capitolo viene descritto il setup sperimentale tramite il quale sono state studiate le caratteristiche dei dispositivi reali. Successivamente sono mostrati e discussi i risultati sperimentali ottenuti.

4 Setup Sperimentale

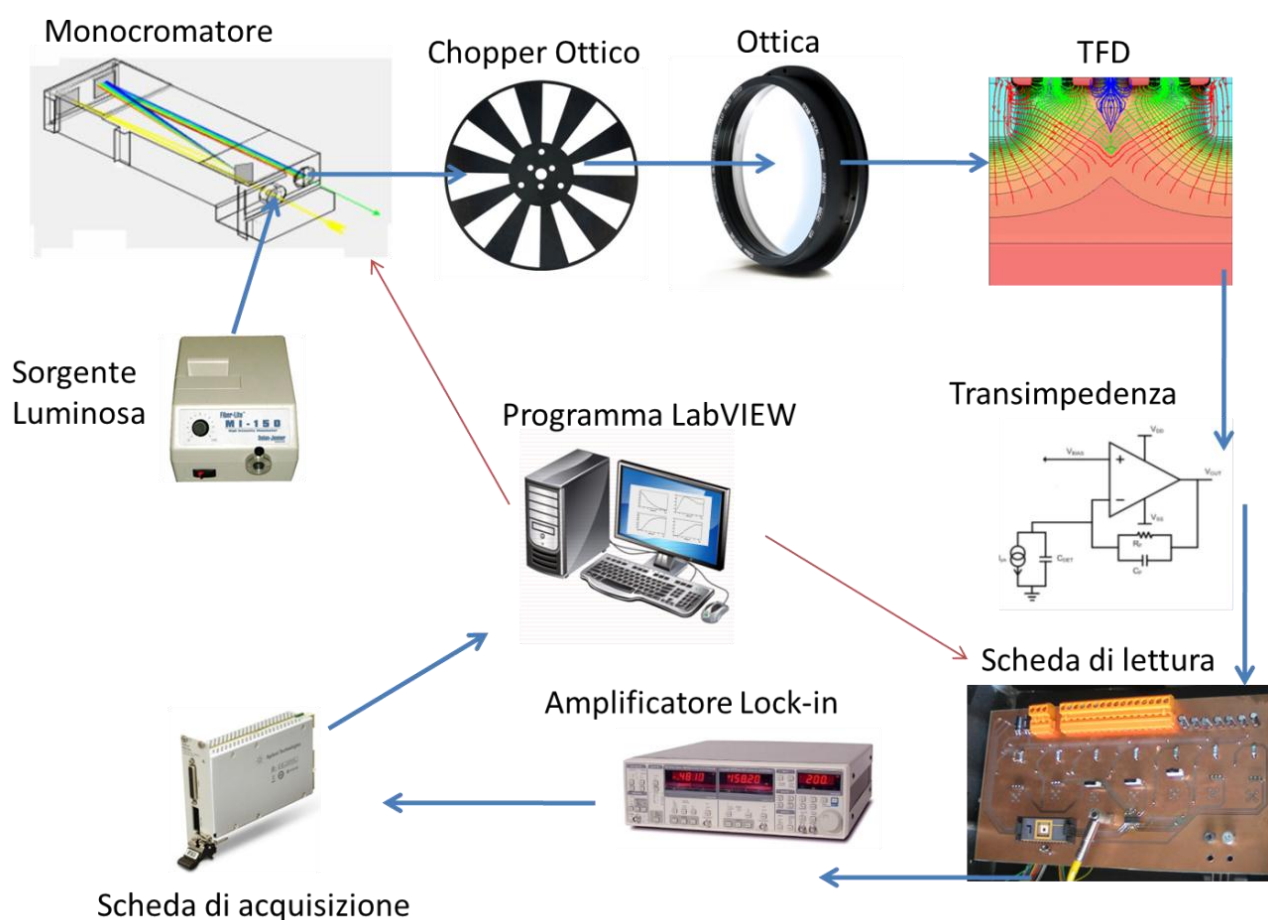


Figura 51 - Rappresentazione mediante schema a blocchi del setup sperimentale utilizzato durante le misure.

In figura 51 si può vedere uno schema a blocchi del setup sperimentale utilizzato per la caratterizzazione del TFD. La misura è automatizzata tramite LabVIEW, che è un linguaggio di programmazione utilizzato per l'acquisizione dei dati, ma che generalmente viene utilizzato in

CAPITOLO 4

tutto ciò che concerne l'automazione industriale. Tramite il linguaggio di programmazione LabVIEW sono stati programmati gli algoritmi di automazione utilizzati per l'acquisizione dei dati nella caratterizzazione del TFD.

In seguito viene descritta la funzione di ogni blocco nelle misure eseguite.

4.1.1 Sorgente Luminosa

La sorgente luminosa è un Dolan Jenner Mi150 (Temperatura correlata di calore pari a 3200 K), la sua caratteristica d'emissione spettrale è stata misurata in laboratorio tramite un diodo di test ed è riportata in figura 52; questa sorgente incorpora al suo interno un filtro infrarosso; il sistema lampada monocromatore, rimuovendo il filtro infrarosso, consente un'illuminazione abbastanza uniforme sullo spettro di interesse, 400 – 1100 nm. Questo tipo di sorgente è adatta alle misure eseguite, perchè senza filtro infrarosso permette l'emissione luminosa in tutto lo spettro che è stato usato nelle simulazioni progettuali del TFD. La sorgente luminosa è accoppiata al monocromatore tramite una guida ottica.

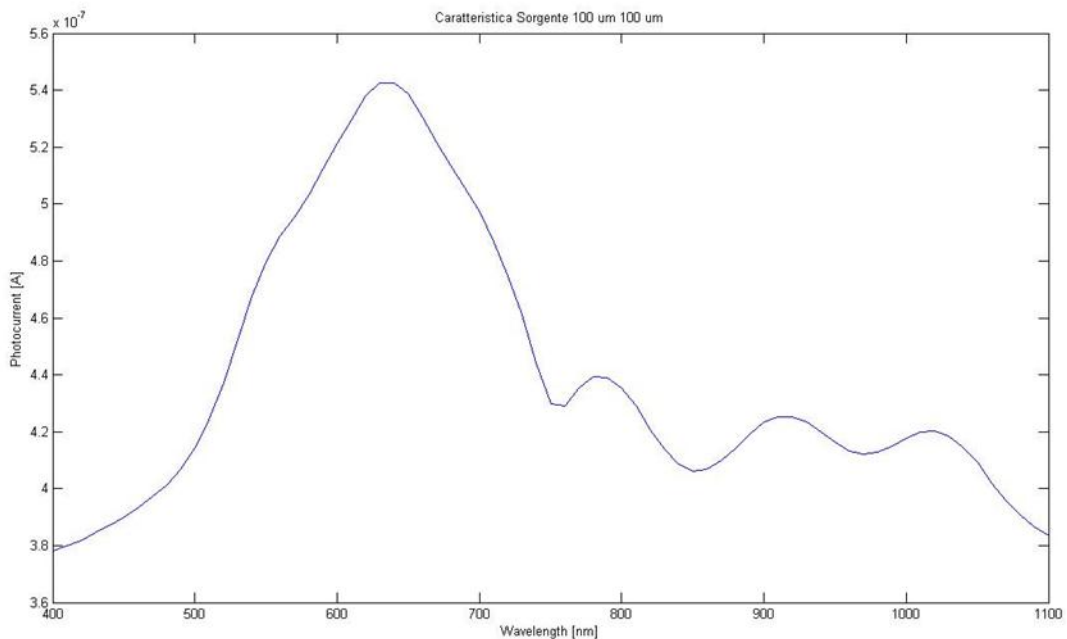


Figura 52 - Caratteristica della sorgente luminosa misurata in laboratorio mediante fotodiodo di test. Durante questa misura le dimensioni delle fenditure di entrata e di uscita del monocromatore sono state entrambe di $100\mu\text{m}$.

4.1.2 Monocromatore

Il monocromatore è un Digikrom DK240 mostrato in figura 53. Tramite dei pattern di diffrazione, può selezionare le singole lunghezze d'onda dallo spettro della sorgente; viene comandato tramite LabVIEW in modo da sincronizzare le misure della risposta spettrale del TFD alla lunghezza d'onda della sorgente. Oltre alla lunghezza d'onda è possibile modificare sempre mediante software la dimensione delle fenditure di ingresso e uscita, tra un minimo di 20 μm ad un massimo di 2000 μm ; in questo modo è possibile decidere la dimensione del fascio luminoso uscente dal monocromatore e incidente sul dispositivo. Le diverse dimensioni della fenditura vengono sfruttate nelle misure, poichè permettono di ottenere un fascio luminoso molto stretto, in grado di illuminare solamente una porzione di dispositivo, possibilità che si renderà molto utile in fase di misura.



Figura 53 - Monocromatore Digikrom DK240 utilizzato nelle misure sperimentali.

4.1.3 Chopper Ottico

Le cariche generate dalla luce incidente sul TFD generano una certa fotocorrente ad ogni anodo. Il primo stadio amplificante di questi segnali è quello presente nella scheda di lettura, ed è composto da amplificatori a transimpedenza. Questi amplificatori sono affetti da rumore $1/f$

CAPITOLO 4

a bassa frequenza, e siccome il segnale misurato da questo stadio è molto debole, è utile modulare la luce ad una frequenza dove sia trascurabile il rumore $1/f$ degli amplificatori operazionali utilizzati nella scheda; perciò, per ottenere un migliore rapporto segnale rumore, la luce viene modulata tramite il chopper ottico alla frequenza di 6 kHz, fuori dalla banda di rumore $1/f$ dei dispositivi. Prima che il segnale venga misurato con la scheda di acquisizione, il segnale viene demodulato tramite il Lock-in Amplifier sincronizzato al chopper.

4.1.4 Ottica

La parte ottica è composta da una lente che risolve il problema della divergenza della luce uscente dalla fessura stretta del monocromatore; per il setup si è scelto un rapporto 1:1 tra immagine e oggetto ottenibile dalla legge:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Dove f è la lunghezza focale della lente utilizzata, p è la distanza tra l'oggetto e la lente, e q è la distanza tra l'immagine e la lente. Essendo la lunghezza focale della lente utilizzata pari a 7.5 cm, per mantenere un rapporto 1:1 sono state utilizzate le seguenti distanze tra lente e monocromatore, $p=2f$, e tra lente e pixel, $q=2f$.

4.1.5 Scheda di lettura

L'ottica focalizza la luce sul sensore, il quale è connesso ad una scheda di lettura che svolge il compito di amplificare il segnale e polarizzare il dispositivo. Il dispositivo è connesso alla scheda tramite i 6 PAD descritti nel capitolo precedente; di questi 6 solamente 4 portano il segnale utile tramite le fotocorrenti, poiché i pad del Guard Ring e dei contatti P sono solamente contatti di polarizzazione, tenuti ad una tensione fissa. I 4 pad dei 4 anodi del dispositivo devono invece essere simultaneamente polarizzati e letti in fase di misura. I 4 pad, da cui provengono le fotocorrenti da misurare, sono collegati alla scheda e vengono amplificati

in parallelo tramite i circuiti a transimpedenza; tutte le uscite dei circuiti di amplificazione a transimpedenza, dopo essere passate attraverso un circuito sottrattore, vengono diretti ad un Mux che seleziona quale dei segnali amplificati portare all'unica uscita della scheda.

I segnali al momento dell'amplificazione sono modulati dal Chopper ottico, e dovranno quindi essere demodulati tramite il Lock-in che ha solo un ingresso. Perciò nonostante l'amplificazione avvenga parallelamente, la demodulazione e la misura dei singoli segnali viene effettuata serialmente. Il Mux presente nella scheda di lettura viene anch'esso controllato tramite LabVIEW, in modo da sincronizzare il segnale misurato dalla scheda di acquisizione all'anodo corrispondente sul dispositivo, per una corretta caratterizzazione. Una spiegazione più approfondita del funzionamento e dei componenti della scheda è presentata in seguito.

4.1.6 Lock-in

L'ingresso del lock-in è connesso all'uscita della scheda di lettura, e la sua uscita è connessa alla scheda di acquisizione. Il lock-in riceve in ingresso uno dei 4 segnali modulati e amplificati dalla scheda di lettura, e lo demodula riportando il segnale in banda base. La frequenza con la quale avviene la demodulazione è sincronizzata tramite un segnale elettrico alla frequenza del chopper. Il lock-in, oltre ad operare la demodulazione, permette di operare un'ulteriore amplificazione del segnale e anche un filtraggio passabasso del segnale demodulato. Siccome il segnale luminoso uscente dal monocromatore è un segnale in banda base, e viene modulato solo successivamente dal Chopper, la sua informazione demodulata risiede tutta in banda base; tutto il segnale misurato dopo la demodulazione a frequenze maggiori di zero è solamente dovuto al rumore elettronico introdotto nell'amplificazione e non al segnale utile; per questo motivo, il filtraggio passabasso operato dal lock-in riduce il rumore elettronico introdotto in fase di amplificazione, e diminuendo la banda del filtraggio passabasso, migliora il rapporto

CAPITOLO 4

segnale rumore. Stringendo la banda di filtraggio migliora il rapporto segnale rumore, ma aumenta il tempo necessario alla misura, infatti diminuendo la frequenza della banda di filtraggio, aumenta la costante di tempo necessaria al filtro per caricarsi. La decisione della banda di filtraggio, e quindi del tempo impiegato per ottenere il valore del segnale in uscita dal lock-in, deve essere tenuta in conto in fase di programmazione in LabVIEW.

4.1.7 Scheda di acquisizione

La scheda è la 3105 della Measurement Computing; essa possiede 8 input/output digitali, un ingresso analogico con un ADC da 32 bit, e 16 uscite analogiche con un output che può variare tra i ± 10 Volt; la scheda è connessa al computer ed è programmata tramite LabVIEW. L'ingresso analogico è connesso all'uscita del Lock-in, e legge il segnale amplificato e demodulato; 3 degli otto output digitali vengono utilizzati per comandare il Mux presente nella Scheda di lettura, in modo da selezionare a quale anodo misurare la fotocorrente; gli output analogici vengono utilizzati per la polarizzazione dei contatti del TFD, e sono anch'essi connessi alla scheda di lettura.

4.1.8 LabVIEW

Mediante il programma LabVIEW, viene campionato e letto il dato acquisito dall'ingresso della scheda di acquisizione, e il processo di misura viene sincronizzato con la fotocorrente dell'anodo corretto controllando il Mux; con il linguaggio di programmazione LabVIEW è stato automatizzato il sistema di misura nel seguente modo: una volta decisa la polarizzazione degli anodi tramite le uscite analogiche della scheda di acquisizione, il programma opera uno sweep delle lunghezze d'onda comandando il monocromatore; partendo da 400 nm e arrivando fino ai 1100 nm, con step di 10 nm; il programma ad ogni step delle lunghezze d'onda opera un ulteriore sweep dei 4 canali degli anodi del TFD, comandando tramite le 3 uscite digitali della scheda di acquisizione, il Mux della scheda di lettura. Quindi per ogni lunghezza d'onda considerata, il programma acquisisce serialmente il valore della fotocorrente amplificato,

misurato ad ognuno dei 4 anodi; per questo motivo la banda di filtraggio del filtro passabasso del lock-in può aumentare considerevolmente i tempi di misura, poichè bisogna operare 4 misure per ognuna lunghezza d'onda considerata.

4.2 Approfondimento della Scheda di lettura

La scheda di lettura, come già accennato, deve assolvere due principali mansioni: la polarizzazione dei contatti del dispositivo e l'amplificazione dei segnali generati dal dispositivo; inoltre siccome il lock-in può demodulare un solo segnale alla volta, la scheda deve essere in grado di sincronizzare e indirizzare ogni segnale serialmente all'entrata del lock-in.

4.2.1 Polarizzazione e amplificazione

I segnali in uscita dal dispositivo sono delle fotocorrenti alla frequenza modulata dal chopper ottico, 6 kHz; inoltre, i contatti dai cui vengono lette le correnti devono poter regolabili in tensione, poichè sono gli stessi anodi che polarizzano il dispositivo; per questo motivo per amplificare le correnti è stato scelto un amplificatore a transimpedenza, il quale ha come segnale di ingresso una corrente, e di uscita una tensione amplificata del guadagno a transimpedenza del circuito.

Il segnale di ogni anodo viene amplificato e polarizzato parallelamente agli altri, nonostante la misura sia di tipo seriale, e l'uscita della scheda di lettura sia solamente una (a causa del lock-in). Non è possibile amplificare solamente il canale da cui si misura il segnale, poichè il dispositivo, per funzionare correttamente, ha bisogno che tutti i suoi anodi siano ad una determinata tensione, necessaria alla corretta polarizzazione del campo elettrico del TFD. Per questo motivo c'è bisogno che ciascuno dei canali, anche quelli non immediatamente acquisiti, debba essere in ogni momento polarizzato tramite un proprio amplificatore a transimpedenza schematizzato in figura 54.

CAPITOLO 4

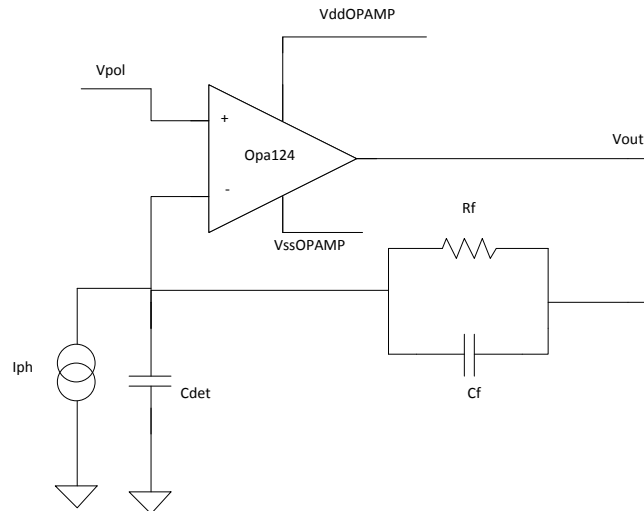


Figura 54 - Rappresentazione schematica dell'amplificatore a transimpedenza utilizzato nella scheda di lettura.

Il generatore di corrente I_{ph} , rappresenta il segnale proveniente da uno dei canali del TDF del, valore tipico di frazioni di pA a picchi di nA, C_{det} rappresenta la capacità introdotta dall'anodo del dispositivo e ha un valore non costante; il valore di C_{det} dipende dall'anodo considerato, e varia tra i 0.5 e 1 pF, ed è maggiore per il canale Nir; entrambi questi componenti sono fittizi, non sono presenti nella scheda di lettura, ma sono una modellizzazione del dispositivo, e vengono tenuti in considerazione per una corretta progettazione e dimensionamento del circuito. L'Opa124 è l'amplificatore operazionale scelto, mentre C_F ed R_F sono la capacità e resistenza che amplificano e filtrano il segnale di corrente I_{ph} proveniente dal pixel. V_{POL} è una tensione esterna che serve a polarizzare l'anodo, mentre $V_{DDOPAMP}$ e $V_{SSOPAMP}$ sono le tensioni tra le quali è alimentato l'amplificatore operazionale. A causa del piccolo segnale da amplificare è stata data molta importanza alla scelta dell'amplificatore operazionale da usare, poichè è necessario introdurre un basso rumore elettronico.

L'Opa124 della Burr-Brown è un Low noise precision Dfet, e per introdurre un minore rumore elettronico utilizza degli amplificatori operazionali a FET; i criteri che sono stati ricercati nell'amplificatore operazionale sono stati:

- Un basso rumore che potesse sovrapporsi al segnale utile.
- Un'alimentazione massima che potesse sopportare le tensioni di alimentazione degli anodi del TFD (15 Volt).

CAPITOLO 4

- Una corner frequency che fosse sufficientemente minore della frequenza a cui il segnale è modulato otticamente tramite il chopper (6 KHz).

L'Opa 124 permette di utilizzare un'alimentazione massima di modo comune ($V_{DDOPAMP} - V_{SSOPAMP}$) di 20 Volt, specifica che è coerente con la polarizzazione del TFD che utilizza tensioni massime di 15 Volt; Il rumore spettrale di corrente all'ingresso del dispositivo vale $0.5 fA/\sqrt{Hz}$. La frequenza d'angolo del rumore $1/f$ è circa 1 kHz come mostrato nei datasheet e riportato in figura 55. Il grafico rappresenta il rumore spettrale di tensione all'ingresso dell'amplificatore Opa 124, e sul grafico è anche rappresentato il posizionamento del segnale utile, P_s .

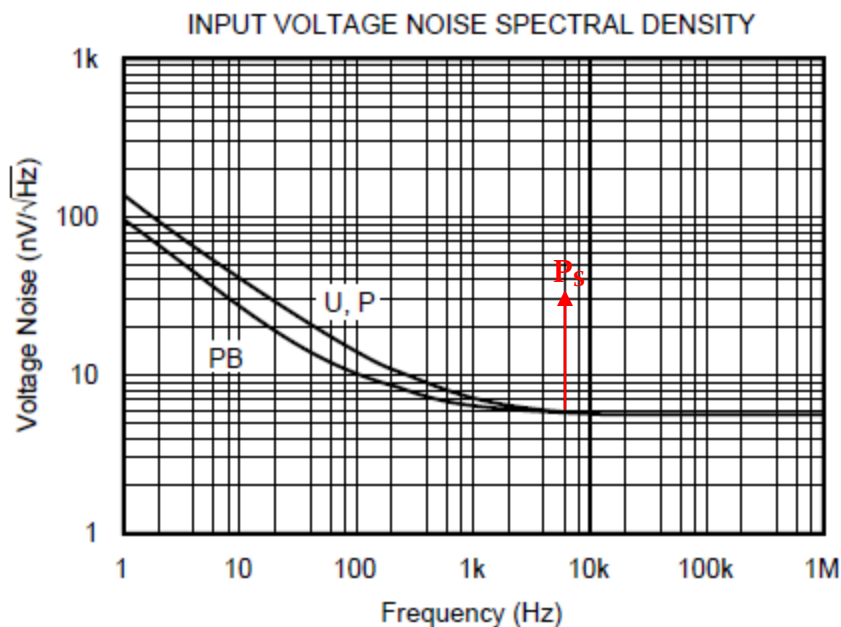


Figura 55 - Caratteristica della potenza spettrale di rumore in ingresso all'Opa 124. In grafico è anche riportata la posizione del segnale utile modulato a 6 kHz.

Il segnale è modulato dal chopper a una frequenza di 6 kHz, e quindi fuori dal rumore $1/f$ introdotto dall'amplificatore. Per ridurre il rumore introdotto nella catena di misura, il carico Z_F , composto da C_F ed R_F , opera un filtraggio passabasso a singolo polo; il filtraggio è dimensionato alla banda di 50 KHz, con $C_F = 318$ fF e $R_F = 10$ M Ω , in modo da non attenuare il segnale utile @ 6 KHz, e filtrare tutto il rumore bianco a frequenze maggiori di 50 kHz. Il

CAPITOLO 4

guadagno dell'amplificatore a transimpedenza è regolato, nella banda del filtraggio passabasso, mediante il dimensionamento della resistenza R_F . Tramite la retroazione negativa, la tensione di uscita dell'amplificatore si porta a una tensione di:

$$V_{out} = \frac{A_0}{1+A_0} \cdot (V_{pol} - I_{ph} \cdot Z_F) \approx V_{pol} - I_{ph} \cdot Z_F \quad 4.1$$

Dove A_0 è il guadagno dell'amplificatore operazionale, Z_F è l'impedenza del carico R_F C_F , e I_{ph} è la corrente di segnale generata dal dispositivo. La forma approssimata è valida a causa dell'elevato guadagno ad anello aperto dell'amplificatore operazionale, che alla frequenza di 10 KHz è di circa 40 dB. La tensione di uscita si porta a una tensione continua di V_{POL} , con sovrapposto il segnale modulato I_{ph} . La capacità C_{det} ha un'impedenza @ 6 KHz molto maggiore dell'impedenza di ingresso dell'amplificatore a transimpedenza, pari a $\frac{R_F}{1+A_0}$, e quindi non ne modifica il guadagno.

Questo tipo di amplificazione ha il vantaggio che il morsetto negativo dell'amplificatore operazionale, tramite la retroazione negativa si porta alla tensione V_{POL} ; in questo modo comandando la tensione al morsetto positivo dell'amplificatore è possibile modificare la tensione di polarizzazione del dispositivo senza modificarne il guadagno $\frac{V_{out}}{I_{ph}}$, ma traslando solamente il valore della continua attorno al quale il segnale viene amplificato. La tensione di off-set dell'amplificatore operazionale modificherà il valore di polarizzazione del dispositivo, rendendo diseguali le tensioni tra i 2 morsetti dell'amplificatore operazionale; questo effetto però è trascurabile poiché l'off-set massimo dell'Opa124 è di 250 μV , e le tensioni di polarizzazione del TFD non sono sensibili a così ridotte variazioni di tensione.

Ogni anodo del dispositivo ha un proprio amplificatore a transimpedenza identico, e siccome l'uscita della scheda di lettura è una sola, tutte le uscite degli amplificatori sono connesse a un multiplexer che permette di selezionare in uscita un solo canale. Ogni uscita però è fissata a una tensione media differente, e pari al valore V_{POL} cui è polarizzato l'anodo del dispositivo. Per portare la tensione di uscita di ogni transimpedenza ad un valore DC di tensione comune, è

CAPITOLO 4

stato aggiunto in serie ad ogni amplificatore un circuito sottrattore schematizzato in figura 56. Il compito del circuito sottrattore è di eliminare da ogni segnale in uscita dal transimpedenza il valore in continua, che è lo stesso a cui è polarizzato l'anodo da cui è misurato il segnale di corrente. Questa operazione serve a non saturare l'ingresso del lock-in, il quale opera con tensioni di ingresso massime di 1 Volt.

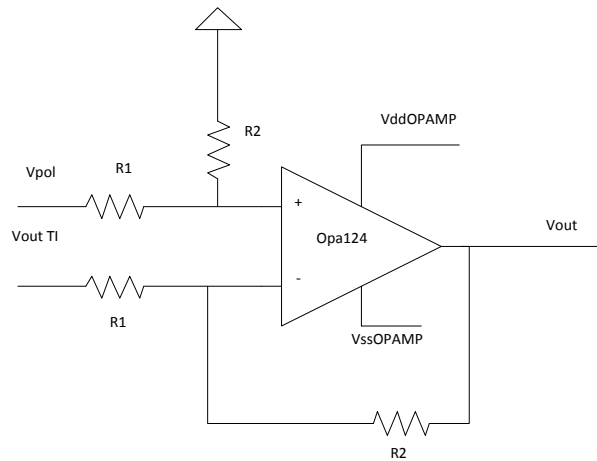


Figura 56 - Rappresentazione schematica del circuito sottrattore.

In figura 56, V_{pol} è la stessa tensione di polarizzazione del rispettivo amplificatore a transimpedenza collegato al circuito sottrattore. L'amplificatore operazionale è lo stesso utilizzato nello stadio precedente, ed è alimentato tra le stesse tensioni $V_{ddOPAMP}$ e $V_{ssOPAMP}$; R_1 ed R_2 sono resistenze esterne che regolano il guadagno del circuito; $V_{out TI}$ è l'uscita dello stadio a transimpedenza che precede lo stadio sottrattore. La tensione di uscita V_{out} cui si porta il circuito sottrattore è:

$$V_{out} = (-V_{OUT TI} + V_{pol}) \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad 4.2$$

Sostituendo a $V_{OUT TI}$ la tensione in uscita dall'amplificatore a transimpedenza calcolata precedentemente calcolata al punto 4.1 si ottiene:

$$V_{out} = -(V_{pol} - I_{ph} \cdot Z_F) + V_{pol}) \cdot \frac{R_2}{R_1} = I_{ph} \cdot Z_F \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad 4.3$$

CAPITOLO 4

In questo modo è possibile eliminare la tensione in continua V_{pol} , in modo da avere in uscita dalla serie dei 2 stadi solamente il segnale utile, $I_{ph} \cdot Z_F$, amplificato ulteriormente dal guadagno $\frac{R_2}{R_1}$ con un valore DC nullo. Questa sottrazione del valore di polarizzazione è fatta in modo da non saturare lo stadio successivo di lettura (lock in), il quale satura ad una tensione di 1 Volt. La progettazione, le simulazioni e il layout della scheda è stato effettuato tramite Orcad Pspice, è in seguito riportato in figura 57 lo schematico della serie dei due stadi appena descritti.

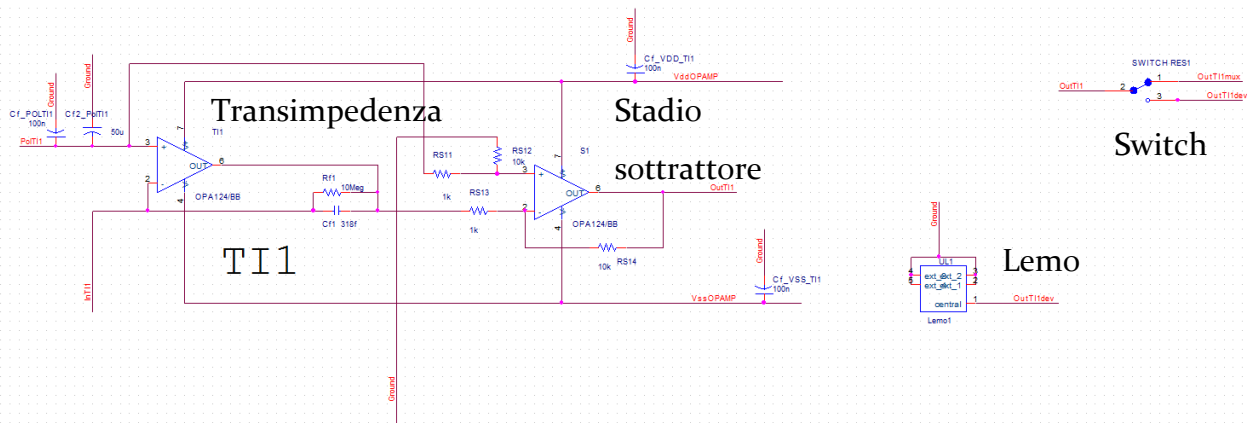


Figura 57 - Schematico dello stadio di amplificazione di ogni canale del TFD.

L'uscita di ogni stadio amplificante è collegata ad uno switch che indirizza l'uscita al Mux o ad un Lemo. Lo switch permette di collegare l'uscita dell'amplificazione ai lemo o al Mux, e serve a fare un controllo del segnale in uscita dall'amplificatore mediante il Lemo, prima di indirizzarlo al Mux, in modo da non rischiare di dannerggialo; inoltre, l'uscita tramite il Lemo può essere utilizzata se si è interessati ad una acquisizione di un singolo canale del dispositivo. Le capacità aggiunte alle alimentazioni servono a filtrare possibili picchi o disturbi che potrebbero danneggiare gli amplificatori operazionali.

Il progetto finale della scheda comprende 7 amplificatori a transimpedenza, anziché solo 4 sufficienti a testare il dispositivo; uno di questi, mostrato in figura 58, è stato utilizzato per fare delle misure di riferimento della sorgente, e anziché ad un anodo del TFD è collegato ad un diodo di test calibrato montato sulla scheda. Tutti e 7 gli stadi di amplificazione a transimpedenza e di sottrazione sono identici. Gli stadi di amplificazione in eccesso sono utilizzati per misure che riguardano altri tipi di dispositivi TFD con più di 4 canali.

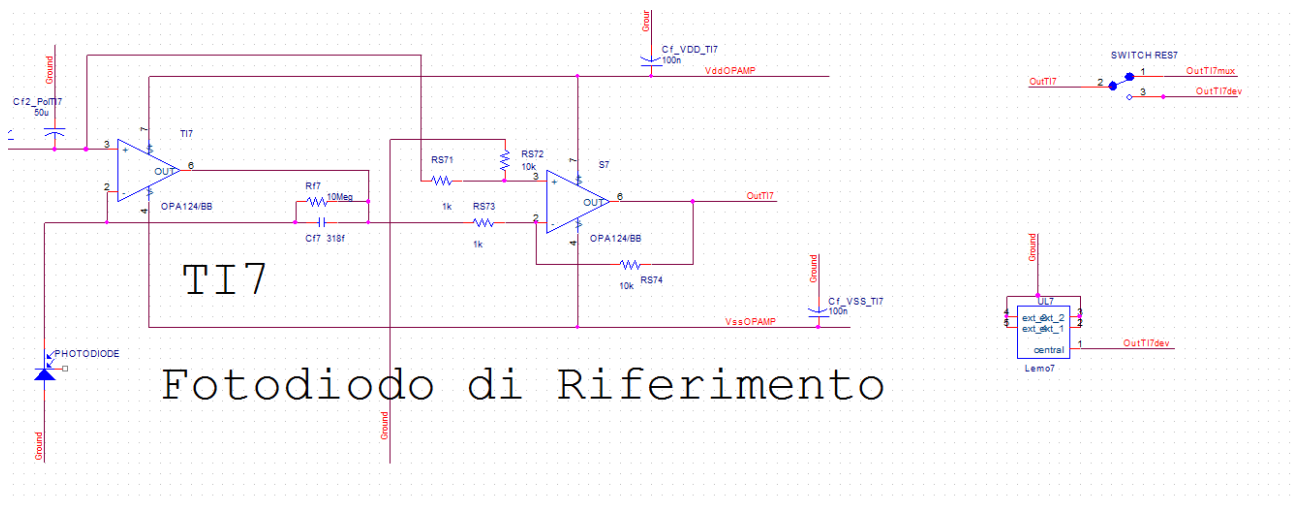


Figura 58 - Schematico dell'amplificatore a transimpedenza e circuito sottrattore del fotodiode di riferimento.

4.2.1.1 Mux

Il multiplexer al quale sono collegati tutte le uscite dei Transimpedenza è il Max4051 della Maxim; possiede 8 canali in entrata ed è stato scelto a causa del basso rumore elettronico che introduce e la sua bassa resistenza di accensione; la R_{on} che il multiplexer introduce è di 100Ω , e la corrente di leakage è di 0.1 nA , valori che non modificano il segnale già amplificato dagli stadi precedenti. Il Mux viene controllato tramite 3 ingressi digitali, con i quali si comanda quale delle 8 uscite collegare al lock-in; i segnali digitali che controllano il Mux provengono dalla scheda di acquisizione, e sono controllati tramite LabVIEW. La tensione di alimentazione del Mux è diversa da quella degli amplificatori a transimpedenza, e ha una dinamica massima di 10 Volt; il circuito sottrattore, all'uscita di ogni amplificatore a transimpedenza, è stato utilizzato non solo per scongiurare la saturazione del lock-in, ma anche per avere un segnale compreso nella dinamica massima del Mux; infatti le tensioni di polarizzazione del TFD possono essere maggiori di quelle sopportate dal Mux. Un altro parametro di scelta del Mux sono i tempi impiegati da questo per connettere un determinato ingresso all'uscita, t_{on} e t_{off} ; entrambi questi tempi sono minori di 200 ns , e sono stati considerati più che accettabili per il tipo di applicazione; infatti il vero collo di bottiglia di tutta la catena di misura è introdotto dal filtraggio del lock-in; il lock-in, per bande molto strette di filtraggio, può impiegare anche

CAPITOLO 4

qualche secondo a restituire il segnale di uscita filtrato, e perciò il tempo impiegato dal Mux per selezionare l'uscita è del tutto trascurabile.

Lo schematico della scheda completa è il seguente e mostrato in figura 59.

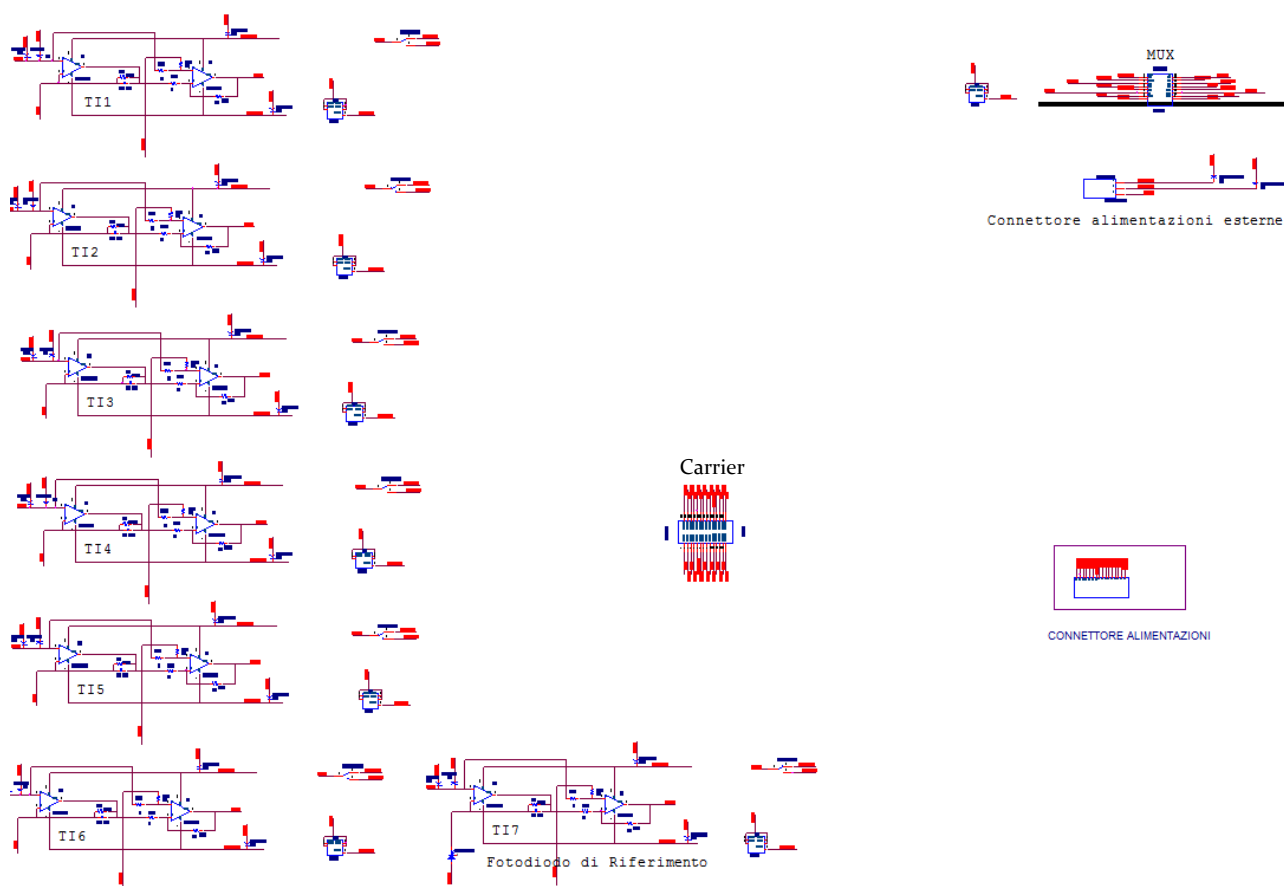


Figura 59 - Schematico ottenuto mediante Orcad della scheda di lettura completa.

In figura 59 sono rappresentati tutti e 7 gli stadi amplificanti, TI1-TI7, il Multiplexer a cui questi sono connessi, le connessioni alle alimentazioni esterne e il carrier che monta il dispositivo. Le tensioni che servono ad alimentare la scheda di lettura provengono dalla scheda di acquisizione e da generatori esterni; i generatori esterni sono necessari per quelle tensioni maggiori di 10 Volt che la scheda di acquisizione non riesce a generare. Al Carrier viene montato il dispositivo da testare e collega i contatti del dispositivo alla scheda.

CAPITOLO 4

Il layout della scheda data la semplicità dei collegamenti e il numero limitato di componenti è stato realizzato su 2 livelli, mostrati in figura 60. La board e l'assemblaggio sono stati completamente realizzati in laboratorio.

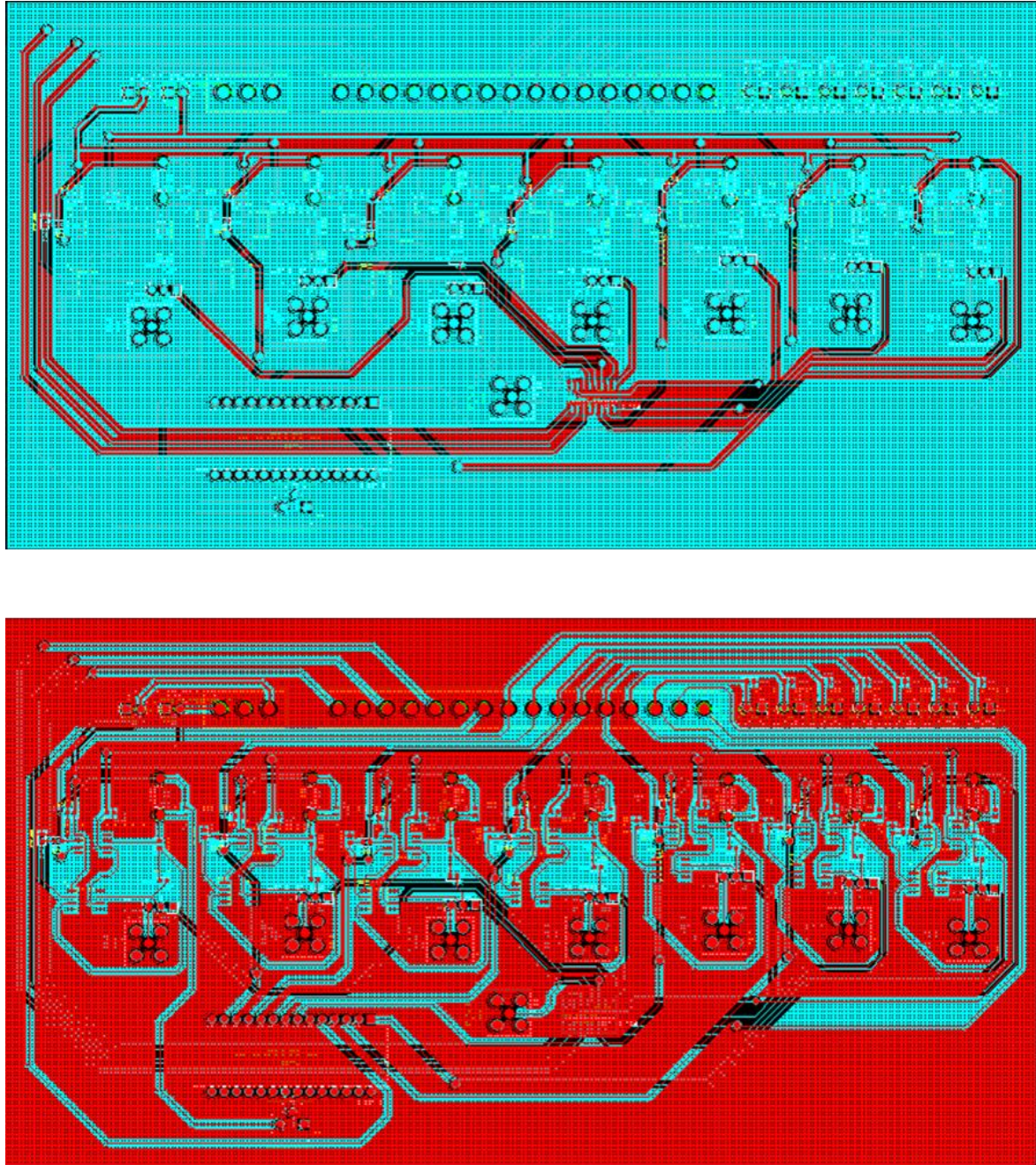


Figura 60 - (Sopra) Layout del top della scheda di lettura. (Sotto) Layout del bottom della scheda di lettura.

4.3 Approfondimento del programma LabVIEW

Il programma fatto mediante LabVIEW permette di operare una misura automatizzata della caratteristica del dispositivo. Il segnale in entrata nella scheda di acquisizione è uno solo e proviene dall'uscita del Lock-in, questo segnale in uscita dal lock-in è campionato e misurato dalla scheda. Tramite il programma LabVIEW è possibile controllare:

- Le tensioni di polarizzazione degli anodi del TFD.
- La lunghezza d'onda del fascio di luce selezionato dal monocromatore.
- La larghezza del fascio di luce incidente il dispositivo.

Gli altri parametri di misura che sono inizializzati prima dell'inizio della misura, e non è possibile modificare tramite LabVIEW sono:

- L'intensità della sorgente luminosa.
- La frequenza di funzionamento del chopper accoppiata con il lock-in.
- La banda del filtraggio passabasso operato dal lock-in successivamente alla demodulazione.
- Il guadagno interno del lock-in.
- Le tensioni di alimentazione dei dispositivi nella scheda e di polarizzazione del TFD maggiori di 10 Volt, tensione massima in uscita dalla scheda di polarizzazione.

Ognuno dei parametri è fondamentale in fase di misura e bisogna tenerne in considerazione attentamente per ottimizzare la misura.

Per misurare sperimentalmente le caratteristiche del dispositivo si utilizza lo stesso procedimento che è stato utilizzato in fase di simulazione: viene eseguito uno sweep delle lunghezze d'onda tra i 400 e i 1100 nm con step di 10 nm, e ad ogni step viene misurata la fotocorrente ad ognuno dei 4 anodi. L'unica differenza dalla simulazione è che non è possibile misurare in contemporanea le 4 fotocorrenti, poiché il Lock-in può demodulare un solo segnale alla volta; per questo motivo ad ogni step delle lunghezze d'onda, prima di misurare la fotocorrente, il Mux, comandato da LabVIEW, deve selezionare il canale a cui associare la

CAPITOLO 4

misura eseguita. Di fatto, questa serialità nella misura quadruplica il tempo necessario alla caratterizzazione del dispositivo, rispetto ad una misura in parallelo dei 4 canali.

La maggior parte della durata della misura è dovuta al filtraggio del lock-in, infatti, per migliorare il rapporto segnale rumore bisogna operare un filtraggio passabasso a banda molto stretta all'uscita del lock-in; il tempo necessario al filtro per caricarsi è inversamente proporzionale alla banda di filtraggio, per questo motivo per ottenere un segnale più pulito dal rumore, è necessario avere lunghi tempi di misura.

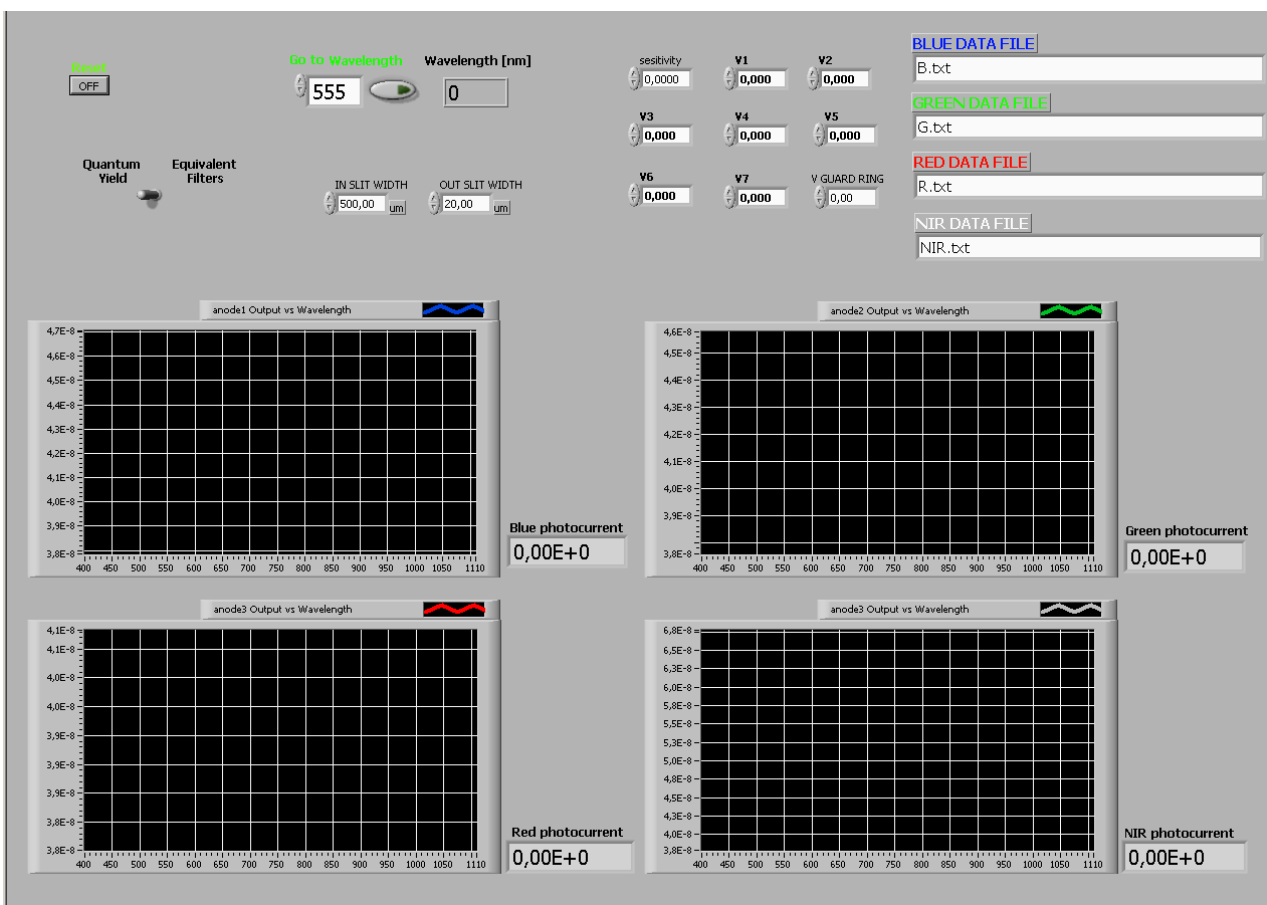


Figura 61 - Finestra di comando del programma di automatizzazione della misura fatto in LabVIEW.

Dalla finestra di controllo del programma LabVIEW, mostrato in figura 61, si possono impostare i parametri delle misure sperimentali. Durante la misura nei 4 grafici vengono mostrate le caratteristiche dei segnali misurate ai 4 anodi. I parametri V_1 V_2 V_3 V_4 V_5 V_6 V_7 e

sono le tensioni di polarizzazione degli amplificatori a transimpedenza, mentre $V_{\text{Guard Ring}}$ è il parametro per controllare la tensione del Guard Ring del dispositivo. Il parametro di sensitivity, è l'inverso del guadagno introdotto dal lock-in, ed è un parametro che non può essere modificato tramite LabVIEW; il segnale viene amplificato dal prodotto del guadagno dell'amplificatore a transimpedenza, del circuito sottrattore e del Lock-in; siccome i guadagni dell'amplificatore a transimpedenza e del sottrattore sono fissati in fase di progettazione, per risalire al valore di corrente misurati, è necessario inserire manualmente il fattore di guadagno del lock-in. Invece i due parametri riferiti alla Slit si riferiscono alla dimensione delle fenditure in ingresso e in uscita dal monocromatore.

4.4 Misure sperimentali

In seguito sono mostrati i risultati delle misure sperimentali operate sul dispositivo. Le misure sono precedute da una descrizione delle non idealità non considerate in precedenza nelle simulazioni; infine sono spiegati i problemi riscontrati e le soluzioni operate.

4.4.1 Differenza tra simulazioni e realtà

La prima differenza tra le simulazioni e le misure sperimentali, è dovuta alla mancanza di uno strato antiriflesso, non disponibile nella tecnologia di Lfoundry al momento del run. Lo strato antiriflesso applicato alle tecnologie di digital imaging riduce la riflettanza della superficie del chip, aumentando, di fatto, la quantità di segnale utile misurabile. La luce incidente sul dispositivo, in parte è trasmessa e genera il segnale utile, e in parte viene riflessa dalla superficie; il rapporto tra la luce riflessa e quella incidente è la riflettanza del materiale. La riflettanza di un materiale è funzione dell'angolo d'incidenza della luce e alla lunghezza d'onda della luce incidente. La riflettanza del silicio cristallino con un angolo d'incidenza perpendicolare alla superficie è riportata in figura 62. E' verosimile considerare angoli di incidenza normali, in

CAPITOLO 4

quanto all'interno di obiettivi di fotocamere commerciali, l'angolo di incidenza raramente supera i 5° - 10° .

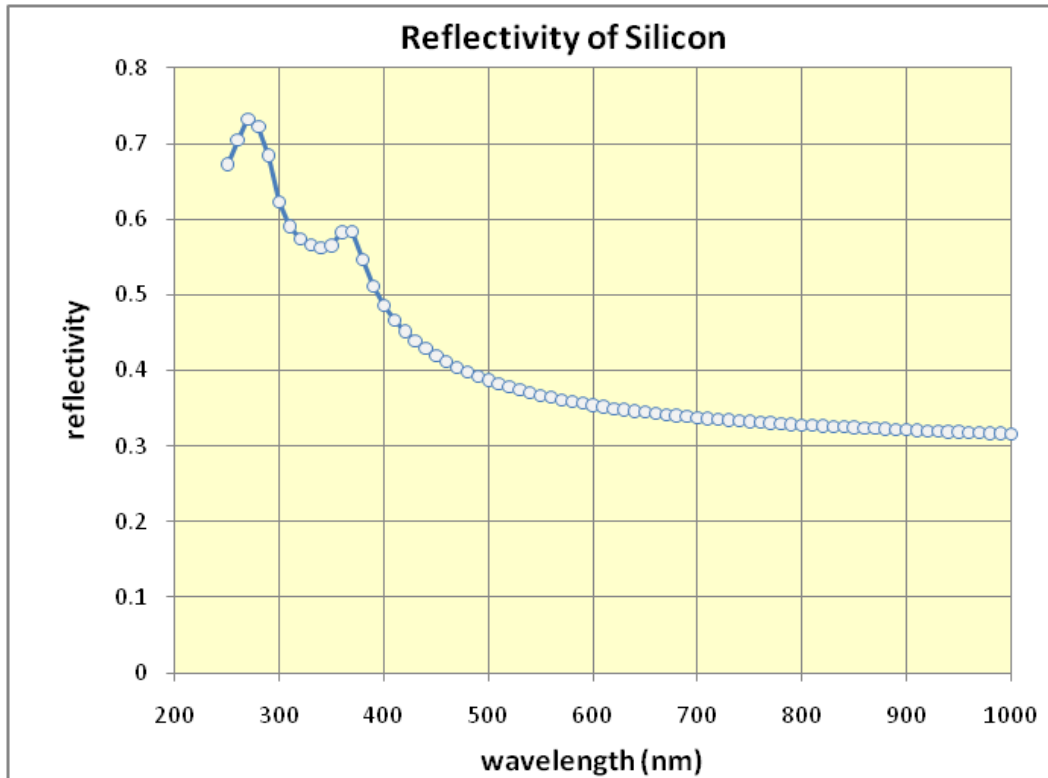


Figura 62 - Caratteristica della riflettanza spettrale del silicio cristallino illuminato ortogonalmente.

La porzione di spettro che interessa le misure è quello compreso tra i 400 e i 1100 nm; si può osservare come la riflettanza abbia un andamento monotono decrescente, e il suo valore è compreso tra un massimo di circa 0.5 (alla lunghezza d'onda di 400 nm), fino ad un minimo di poco più di 0.3 ($\lambda=1100$ nm); ciò vuol dire, ad esempio, che solamente la metà della luce alla lunghezza d'onda di 400 nm incidente il dispositivo verrà trasmessa e potrà generare il segnale utile; anche nel caso più favorevole a $\lambda=1100$ nm, la luce riflessa supera il 30%, e provoca una grave diminuzione del segnale utile, che degrada il rapporto segnale rumore. Nelle tecnologie ottiche commerciali è sempre presente uno strato antiriflettente che riduce consistentemente la luce riflessa, migliorando così il rapporto segnale rumore e conseguentemente il minimo segnale misurabile.

CAPITOLO 4

Un'altra differenza tra le misure del dispositivo reale e le simulazioni è la presenza di strati alternati di ossido e nitruro sulla superficie del chip. In figura 63 è mostrata una simulazione effettuata dalla foundry utilizzata per la produzione dei dispositivi di questa tesi, riguardante la responsività in presenza di strati alternati di dielettrico, confrontata con la responsività teorica massima del medesimo substrato di Silicio. Si può osservare come questa alternanza di strati di nitruro e ossido, di dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione incidente, comporti l'insorgere di fenomeni multipli di interferenza che portano a forte disuniformità della luce trasmessa fino allo strato attivo dove è implementato il dispositivo. Nelle tecnologie ottiche commerciali tale fenomeno è fortemente ridotto attraverso uno specifico dimensionamento dei layer e una riduzione del numero di metallizzazioni sopra le aree attive.

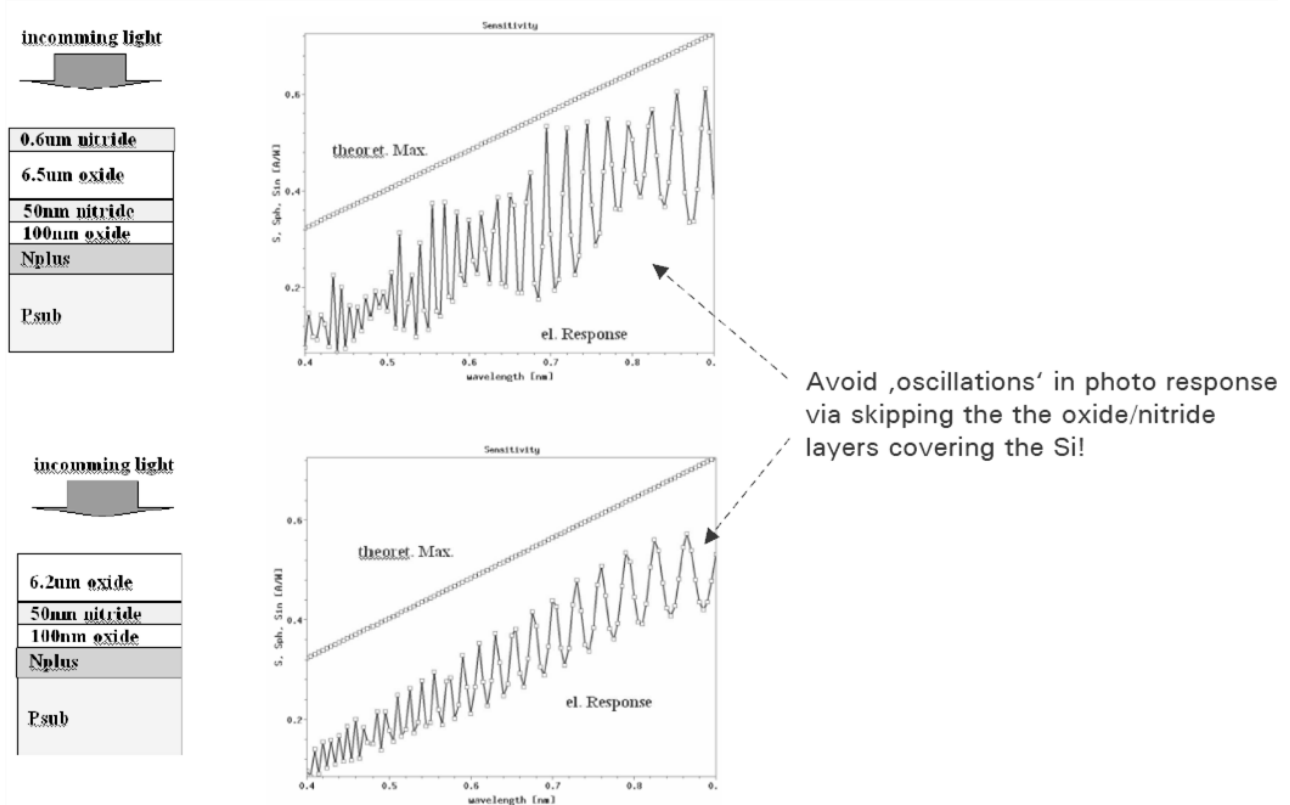


Figura 63– Simulazione della responsività di un fotodiode in tecnologia LFoundry. In alto con tutti gli strati SiO_2 e Si_3N_4 presenti in caso di 6 metal. In basso per un numero di metal ridotto.

CAPITOLO 4

Un'altra differenza tra le simulazioni fatte tramite Dessis e il dispositivo reale è la tensione di Punch-through tra gli anodi simulata nel capitolo 3. Nelle simulazioni preliminari, è stata stimata la massima differenza di potenziale tra 2 contatti del dispositivo prima che si instaurasse una corrente di punch-through; in questo modo è stato possibile valutare le polarizzazioni ottimali, senza utilizzare tensioni che provocassero nel dispositivo correnti di punch-through. In condizione di punch-through, la corrente di breakdown che scorre tra i 2 contatti interessati, diverge ed è molto maggiore della corrente di segnale; in questa condizione il dispositivo diventa inutilizzabile, poiché si ha la saturazione degli stadi di lettura e non è più possibile misurare il segnale utile. Nelle simulazioni Dessis la differenza di potenziale massima, prima di incorrere nel punch-through, applicabile un anodo e il substrato, è di circa 17 Volt [9]. Invece nelle prime misure preliminari fatte sul dispositivo reale, è stato riscontrato che già con differenze di tensioni maggiori di 12 Volt tra 2 contatti adiacenti, il dispositivo comincia a non funzionare a causa delle correnti di punch-through. Questa limitazione di tensioni applicabili ai contatti del dispositivo, ha impedito di utilizzare esattamente i set di polarizzazioni risultati ottimi in fase di simulazione, e ha reso necessario ricercare un nuovo set di polarizzazioni ottimali compatibili con i limiti di tensioni che innescano il break-down tra 2 contatti.

4.4.2 Illuminazione dell'intero Device

Come già descritto il monocromatore Digikrom DK240 è in grado di variare la dimensione della fenditura di ingresso e di uscita; modificando la dimensione della fenditura è possibile variare la larghezza del fascio luminoso incidente il dispositivo. Il fascio luminoso all'uscita del monocromatore si presenta come una linea dallo spessore proporzionale alla fenditura scelta.

Tramite la regolazione della fenditura è quindi possibile scegliere la porzione di dispositivo da illuminare. Le prime misure sono state compiute illuminando l'intero dispositivo. In queste condizioni è emerso un problema non riscontrato in fase di simulazione; le risposte spettrali delle misure fatte illuminando l'intero chip, presentano un comportamento imprevisto nelle caratteristiche spettrali del canale Nir; infatti le risposte di tale canale mostrano un offset più o

CAPITOLO 4

meno di uguale ampiezza a tutte le lunghezze d'onda; ciò indica che questo anodo raccoglie delle cariche generate anche alle basse lunghezze d'onda.

Questo comportamento imprevisto delle risposte è stato attribuito ad una raccolta delle cariche generate ai bordi del dispositivo. Per un corretto funzionamento del dispositivo infatti è necessario che la radiazione illumini il TFD solamente nelle regioni dove è stata fatta una finestratura tramite i piani di metal; in questo modo le cariche elettriche sono generate solo in quelle determinate regioni di spazio del dispositivo, dove il campo elettrico ha la geometria trasversale richiesta, cosicché ogni anodo del dispositivo ha una determinata profondità di raccolta. La generazione delle cariche in regioni di spazio diverse da quelle finestrate, può modificare la risposta spettrale del dispositivo, in particolare per il canale infrarosso, essendo questo quello più esterno per il dispositivo disegnato. Siccome tutta la superficie del dispositivo è ricoperta dalla metal, con delle aperture solamente nelle regioni di finestratura, si è ipotizzato, che la generazione delle cariche che introducono questo disturbo, potesse essere attribuita al bordo del dispositivo. In realtà in fase di design il bordo del dispositivo, per evitare che le cariche generate al di fuori del TFD potessero corrompere il funzionamento, è stato circondato dal guard ring. Il guard ring è polarizzato ad una tensione positiva, e serve appunto alla raccolta delle cariche elettriche generate esternamente al dispositivo; tuttavia la regione di bordo non è schermata tramite una metallizzazione, come mostrato in figura 64. Nella stessa misura è mostrato anche un ingrandimento di una parte di bordo del TFD; questa è la regione nella quale sono generate le cariche che non permettono al dispositivo di funzionare come previsto. Il Guard Ring, polarizzato alla stessa tensione del canale NIR, è in grado di raccogliere ed eliminare in prima approssimazione solamente metà delle cariche generate in questo bordo, infatti l'altra metà verrà attratta dagli anodi del dispositivo polarizzati alla stessa tensione; anche aumentando la tensione di polarizzazione del Guard Ring, in realtà nel bordo la raccolta è principalmente ottenuta per diffusione e quindi non è possibile raccogliere più della metà della carica generata. All'apparenza queste cariche generate nel bordo potrebbero sembrare trascurabili, ma a causa del basso Fill Factor del dispositivo (rapporto tra l'area attiva del dispositivo, e la superficie totale), è stato stimato che il rapporto tra l'area attiva del dispositivo (area del dispositivo non ricoperta dalle metal), e metà dell'area della regione di bordo tra il dispositivo e il guard ring, è circa 5. In seguito sono state compiute delle nuove simulazioni tramite Dessis, che hanno incluso un'illuminazione laterale del dispositivo proporzionale

all'area della regione di bordo del dispositivo reale; le risposte ottenute, in effetti, presentano lo stesso gradino nella risposta spettrale rossa e Nir.

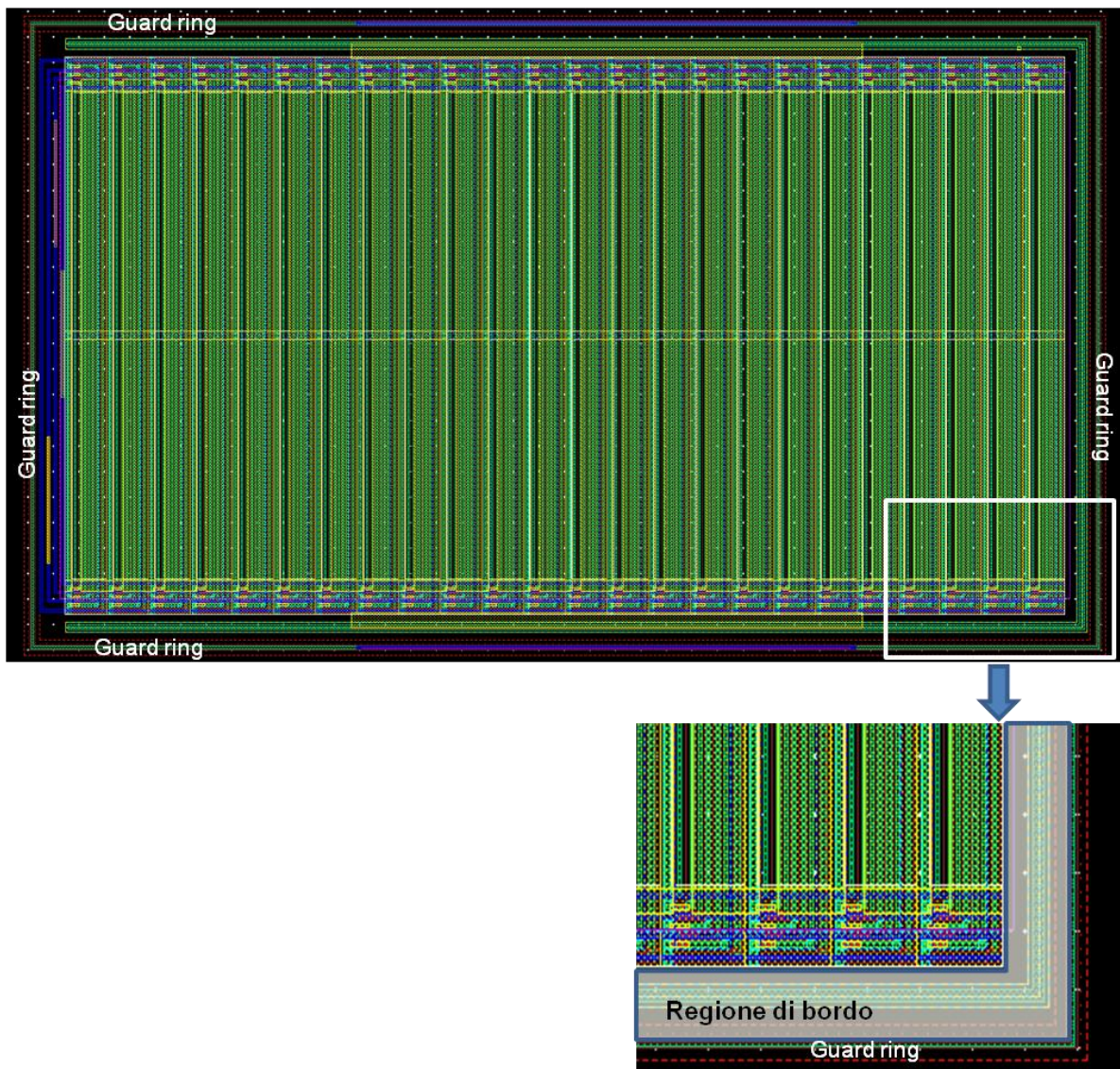


Figura 64 - Layout dell'intero dispositivo e ingrandimento di un bordo del dispositivo. E' evidenziata la regione di bordo non ricoperta dalla metallizzazione a cui è attribuita la generazione di cariche di disturbo.

4.4.3 Illuminazione Parziale del device

La soluzione che è stata inizialmente utilizzata per cercare di ridurre l'incidenza delle cariche generate nella regione di bordo, è stata quella di illuminare il dispositivo solo parzialmente. Come già spiegato, il monocromatore emette un fascio luminoso tramite una fenditura

regolabile; la lunghezza del fascio è molto maggiore delle 2 dimensioni spaziali del dispositivo, e quindi è impossibile, ad esempio, focalizzare la luce solamente nell'area attiva del dispositivo; invece è realizzabile una illuminazione parziale che interessa solo una delle due dimensioni del dispositivo. Per ridurre al minimo l'area della regione di bordo illuminata, il dispositivo è stato illuminato solo parzialmente come si può vedere in figura 65. Questo tipo d'illuminazione è stato possibile stringendo la fenditura del monocromatore, e facendo attenzione al verso in cui si è deciso di montare il chip al carrier della scheda di lettura.

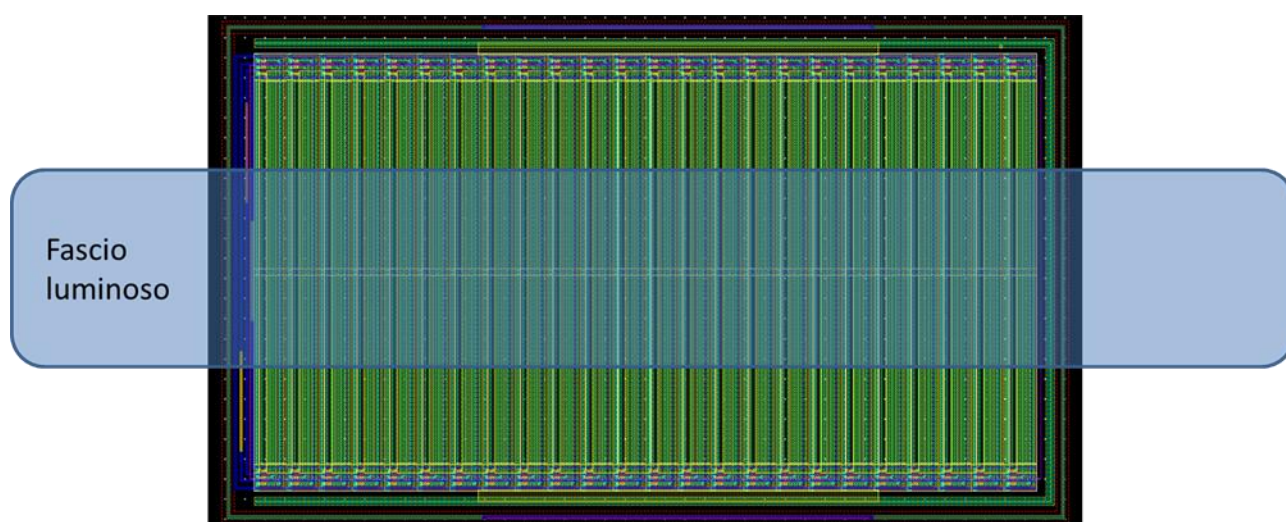


Figura 65 - Schematizzazione dell'illuminazione parziale del dispositivo.

In questo modo si è cercato di aumentare il rapporto tra l'area attiva del dispositivo illuminata, e la regione di bordo che disturba la misura. Un effetto collaterale di questo tipo d'illuminazione è di ridurre l'intensità del segnale utile, e quindi di peggiorare il rapporto segnale rumore.

Il comportamento molto rumoroso delle risposte è evidente nella porzione spettrale iniziale attorno ai 400 nm; in questa regione spettrale una serie di fattori rende il rapporto segnale rumore peggiore, infatti:

1. L'intensità luminosa della sorgente è minima come è mostrato nella caratteristica della sorgenti in figura 52.
2. A basse lunghezze d'onda, data la mancanza di coating antiriflesso e microlenti, la riflettività è massima, e quindi parte del segnale utile è riflesso dalla superficie senza essere assorbito.

CAPITOLO 4

3. Per ridurre l'effetto dell'illuminazione della regione di bordo, l'area attiva del dispositivo non è illuminata completamente.

Questa somma di fattori rende le acquisizioni a basse lunghezze d'onda molto rumorose.

In figura 65, sono presentati i filtri equivalenti delle risposte spettrali misurate tramite un'illuminazione parziale del device, operata come descritta in precedenza; le tensioni utilizzate per polarizzare i sei contatti del dispositivo sono le seguenti: N1= 0.7 V, N2= 2V, N3= 11V, N4= 14V, GR= 14V, P= 0V. La sorgente luminosa è stata utilizzata alla massima intensità impostabile; Il segnale luminoso è modulato tramite il chopper a una frequenza di 6KHz e il lock in opera un filtraggio passabasso del segnale con una costante di tempo di 300 ms.

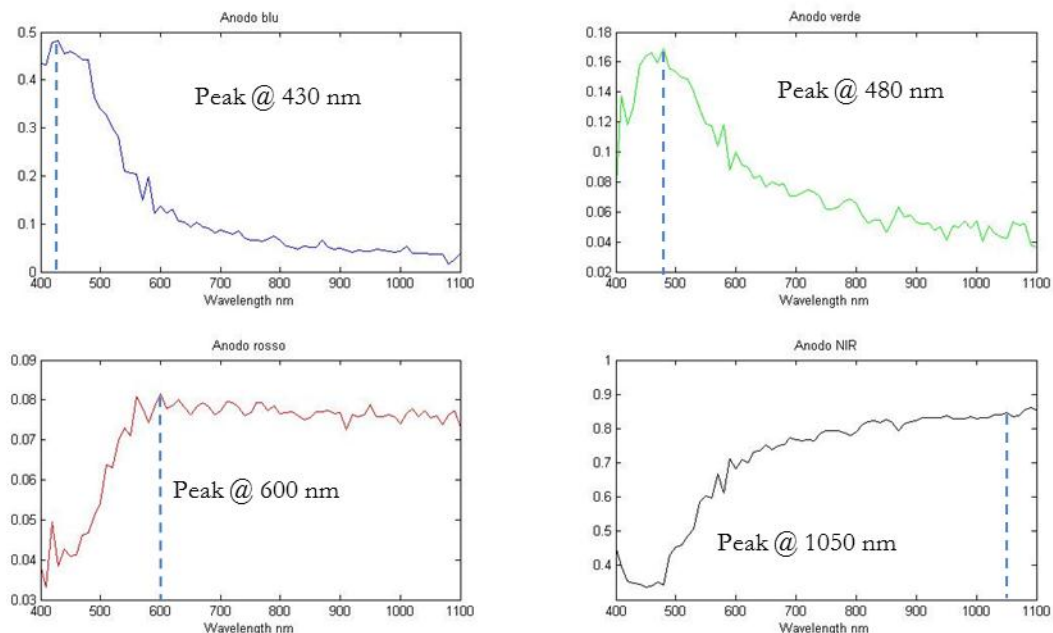


Figura 66 - Filtri equivalenti ottenuti dalle misure sperimentali dei 4 canali del dispositivo.

Si notano picchi di risposta a 430 nm. A 480 nm, a 600nm e a 1050 nm, rispettivamente per l'anodo blu, verde, rosso e Nir. Le variazioni brusche delle caratteristiche, sono dovute all'alternanza degli strati di ossido e nitruro. Si può notare che laddove il segnale utile è maggiore, grazie ad una maggiore intensità della sorgente e una minore riflettività del silicio, le caratteristiche hanno un comportamento che più si avvicina a quello simulato, riportato nuovamente per comodità del lettore in figura 67. Permane un offset sul canale Nir, che non

CAPITOLO 4

parte da 0 come ci si aspetterebbe. Tuttavia, il miglioramento ottenuto ha validato l'ipotesi di raccolta spuria dalle zone di bordo, e quindi ha dettato le linee guida per il re-design.

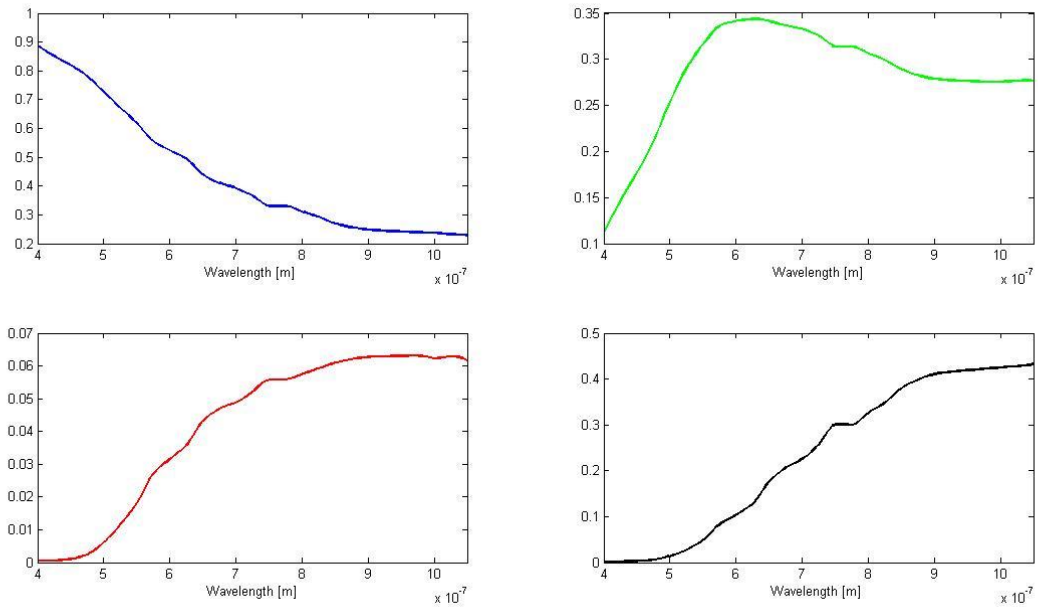


Figura 67 - Filtri equivalenti simulati tramite Matlab nel capitolo 2, delle risposte spettrali ottime.

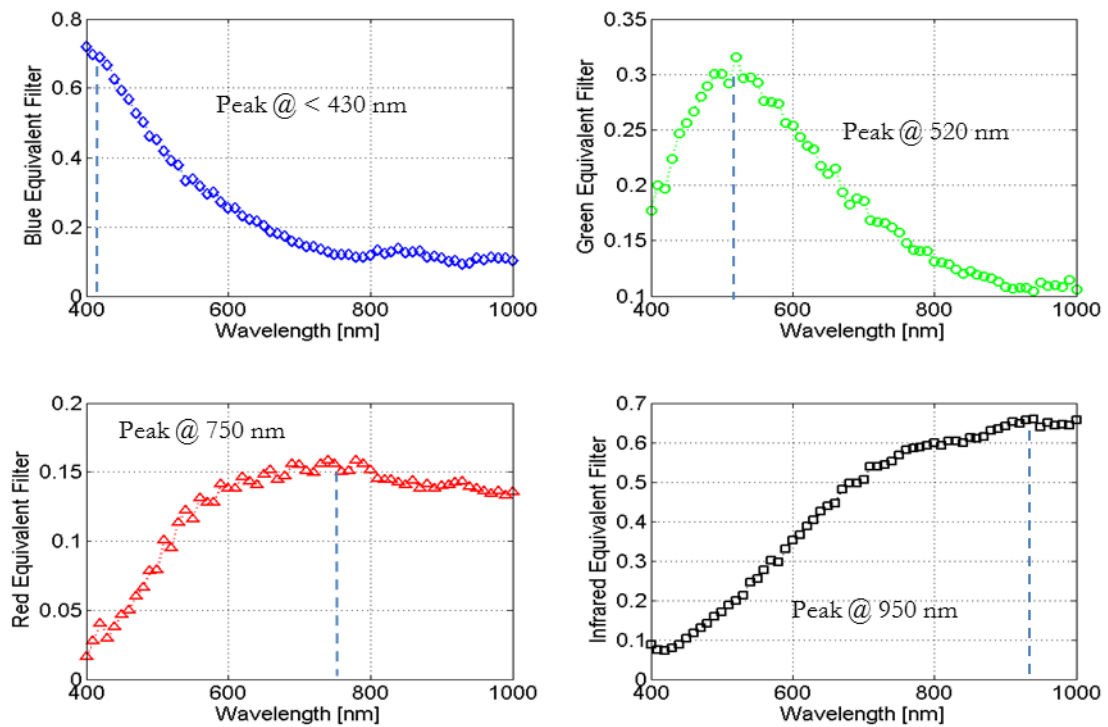


Figura 68 - Filtri equivalenti del secondo design del dispositivo.

4.4.4 Re-design del dispositivo e nuova campagna di misure

Per ottenere delle risposte spettrali con un rapporto segnale rumore migliore, e risolvere il problema dell'offset nel canale Nir, è stato operato un re-design del pixel. Il nuovo design del pixel ha in aggiunta rispetto a quello precedente una mascheratura, operata con un piano di metal, della regione compresa tra il pixel e il guard ring; la copertura ha inoltre interessato anche tutta un'area attorno al device per prevenire la raccolta per diffusione da zone vicine. Il nuovo design è stato implementato in tecnologia Lfoundry, uguale a quella utilizzata per precedente design. In figura 68 sono rappresentate i filtri equivalenti delle risposte spettrali del nuovo dispositivo con le seguenti tensioni di polarizzazione: $N1= 0.7 \text{ V}$, $N2= 4\text{V}$, $N3= 15\text{V}$, $N4= 9\text{V}$, $GR= 15\text{V}$, $P= 0\text{V}$. In questa misura il dispositivo è stato illuminato completamente, e non solo parzialmente come accadeva invece nel caso di figura 65; infatti questo nuovo design non risente del problema della raccolta delle cariche generate in superficie da parte dei canali NIR, in modo da eliminare l'offset nella sua risposta spettrale. Queste risposte spettrali della figura 68 sono meno rumorose di quelle misurate in precedenza (Figura 66), poiché è stato possibile illuminare il dispositivo completamente in tutte le sue zone attive, aumentando così il segnale utile.

In figura 69 (a) invece sono riportate le risposte spettrali del dispositivo polarizzato con 19 diversi set di tensioni nei range di seguito specificati: $N1= [0.5 - 2] \text{ V}$, $N2= [1 - 4] \text{ V}$, $N3= [10 - 15] \text{ V}$, $N4= [15 - 17] \text{ V}$, $GR= 17\text{V}$, $P= 0\text{V}$. In funzione dell'applicazione richiesta, il set di tensioni ottimo e le conseguenti risposte spettrali potrebbero essere infatti differenti da quelle mostrate nella figura 68. La possibilità di questi tipi di tuning delle risposte spettrali è un vantaggio che distingue il TFD dalla maggior parte dei sensori presenti sul mercato e/o analizzati nella letteratura scientifica.

La figura 69 (b) mostra infine per un unico set di polarizzazioni le fotocorrenti misurate, i filtri equivalenti, l'efficienza quantica calcolata sulla base dello spettro dell'illuminante misurato e mostrato in figura 52, e quella che si otterrebbe in presenza di strato antiriflesso.

CAPITOLO 4

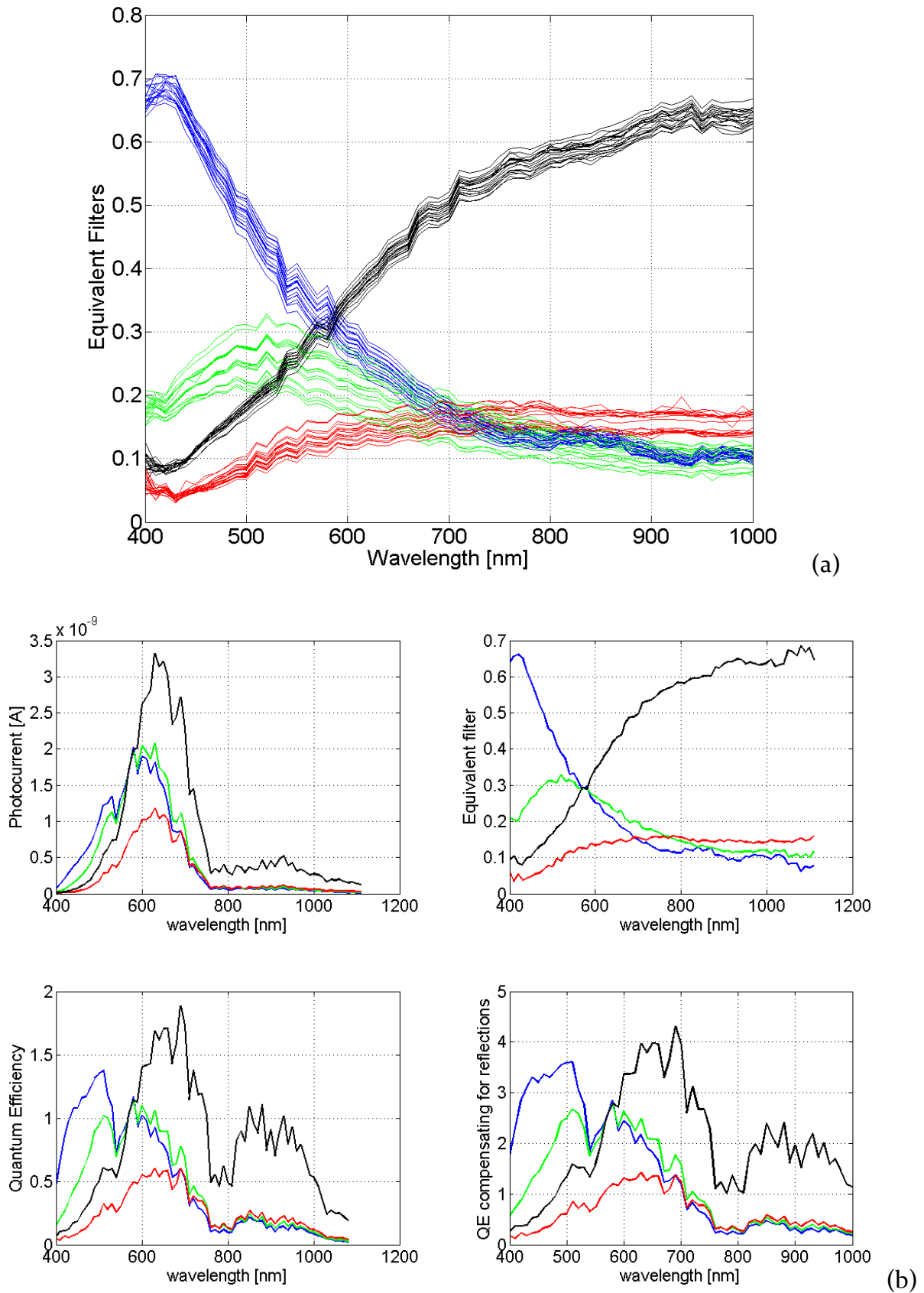


Figura 69 – (a) Filtri equivalenti del secondo design del dispositivo con 19 differenti polarizzazioni; (b) esempio di conversione delle fotocorrenti – misurate tramite gli stadi a transimpedenza – nei corrispondenti filtri equivalenti (in alto a destra), efficienze quantiche (in basso a sinistra, unità arbitrarie) ed efficienze quantiche compensate per tenere conto dell'assenza di strati antiriflesso.

In particolare, grazie alla parziale possibilità di tuning delle risposte spettrali tramite le tensioni di polarizzazione, è possibile iterare empiricamente l'algoritmo di identificazione delle risposte spettrali ottime per una data applicazione mostrato nel capitolo 2.

4.5 Conclusioni

Nel presente lavoro di Tesi è stata per la prima volta studiata e sperimentata la possibilità di realizzare un pixel in Silicio sensibile, nella medesima posizione spaziale, su 4 bande spettrali centrate nel visibile e vicino infrarosso. Il pixel prototipo qui studiato si basa sul principio di funzionamento del Transverse Field Detector, adeguatamente modificato, per consentire l'acquisizione sul quarto canale.

Si è analizzato in particolare come dal punto di vista teorico, l'andamento delle risposte spettrali, dipendente dal coefficiente di assorbimento della radiazione in maniera quasi proporzionale tra i vari canali oltre una certa lunghezza d'onda intorno a 750 nm, consenta un'efficace correzione del cross-talk della radiazione infrarossa nei canali visibili, con ridotta propagazione di rumore associata all'operazione.

Per quanto riguarda il problema simmetrico (il crosstalk della radiazione visibile nel canale infrarosso), si è ritenuto per ora trascurabile in quanto l'applicazione per cui il pixel è stato studiato (3D imaging), si basa sulla generazione di un pattern di luce strutturata la cui lunghezza d'onda può essere convenientemente scelta in una regione in cui la risposta dei canali R, G e B è pressoché nulla (ad esempio 870 nm).

La realizzazione ed il test di un prototipo di pixel ha consentito inizialmente una parziale verifica delle ipotesi, ciò dovuto al fatto che la risposta spettrale del canale infrarosso era nella prima versione affetta da una raccolta dalle zone di bordo.

Il tentativo di ridurre la radiazione incidente ad un sottile fascio (minore della larghezza del pixel) per evitare raccolta dalle zone di bordo ha permesso di ottenere un parziale

CAPITOLO 4

miglioramento ed ha così suggerito un re-design in cui le zone di bordo fossero opportunamente mascherate. A seguito del redesign, il pixel a 4 canali di TFD ha mostrato un comportamento in linea con quanto atteso dalle simulazioni CAD.

Per potere valutare effettivamente la bontà del sistema di acquisizione a 4 bande qui proposto in via preliminari, sono necessari almeno i seguenti step:

- il primo prevede la sperimentazione sul campo di tale dispositivo, intendendosi con ciò non la sola caratterizzazione delle risposte spettrali, ma la diretta misura di colore e radiazione infrarossa provenienti da una scena opportunamente individuata (ad esempio una specifica carta colore illuminata da sorgente nota);
- il secondo step prevede una valutazione di possibili implementazioni di elettronica di lettura a livello di pixel. Poiché ciascun pixel richiede ben 4 differenti elettroniche di lettura, si dovranno valutare tecniche di minimizzazione dell'area da esse occupata, o eventuali tecniche di condivisione dell'elettronica tra più pixel, per non peggiorare ulteriormente il Fill Factor.

Ulteriori sviluppi, parzialmente oggetto del presente lavoro di Tesi, riguarderanno anche l'implementazione di strutture a 5 bande (R, G, B, NIR1 e NIR2) il cui scopo è rendere disponibile un sensore eclettico, caratterizzato da diverse risposte spettrali accordabili nel range tra i 400 nm e i 1100 nm.

Bibliografia

- [1] W. Arden, M. Brillouët, P. Coge, M. Graef, B. Huizing e R. Mahnkopf, «"More than Moore" White Paper,» 2010.
- [2] B. Gunturk, J. Glotzbach e Y. Altunbask, «Demosaicking: color filter array interpolation.,» *IEEE Signal Processing*, jan. 2005..
- [3] B. E. Bayer, «Color imaging array». U.S.A Brevetto 3 971 065, 20 Jul. 1976.
- [4] A. El Gamal e H. Eltoukhy, «CMOS image sensors,» *IEEE Circuits*, p. 6–20, May/Jun. 2005..
- [5] Foveon, «Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure». U.S Brevetto 5 965 875, 12 Ottobre 1999.
- [6] D. L. Gilblom, «Real-time color imaging with a CMOS sensor having,» *Proc. SPIE Annu. Meeting*, vol. 5210, p. 105–115, 2004.
- [7] A. Longoni, F. Zaraga, G. Langfelder e L. Bombelli, «The Transverse Field Detector (TFD): A Novel,» *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, vol. 29, n. 12, DECEMBER 2008.
- [8] G. Langfelder, T. Malzbender, A. Longoni e F. Zaraga, «A device and an algorithm for the separation of visible and near infrared signals in a monolithic Silicon sensor,» *Visual Information Processing and Communication II*, 2011.
- [9] G. Langfelder, «"Isolation of Highly Doped Implants on Low-Doped Active Layers for CMOS Radiation Drift Detector,» *IEEE Transactions On Electron Devices*, vol. 56, pp. 1767-1773, 2009.
- [10] G. Langfelder, F. Zaraga e A. Longoni, «Tunable spectral responses in a color-sensitive cmos pixel for imaging applications,» in *Electron Devices*, IEEE Transactions on, nov. 2009., p. 2563 –2569.

- [11] A. Pelamatti, *Design and characterization of cmos active pixels with a tunable color space*, Dec. 2011..
- [12] P. Debevec e J. Malik, «Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs,» in *ACM SIGGRAPH 97*, T. Whitted, 1997., p. 369–378.
- [13] T. Ashida, H. Yamashita, M. Yoshida e O. Saito, «Signal processing and automatic camera control for digital still cameras equipped with a new type CCD,» in *Sensors and camera systems for scientific, industrial, and digital photography applications*, San Jose CA, January 2004.
- [14] Z. Xiaopeng e T. Sim, «Enhancing Photographs with Near Infrared Images,» in *IEEE Computer Society Conference on*, Anchorage, US, 2008.
- [15] L. Schaul et al., «Color Image De-hazing using the Near-Infrared,» in *IEEE International Conference on*, 2009.
- [16] S. Susstrunk e N. Salamati, «Material-based object segmentation,» in *Color Imaging Conference*, 2010.
- [17] S. Lee, K. Choi e D. Kim, «Signal Separation Coding for Robust Depth Imaging Based on Structured Light,» *IEEE*, vol. 4, pp. 4430-4436, 2005..
- [18] J. Salvi, J. Pagès e J. Batlle, «Pattern codification strategies in structured light systems,» in *Pattern Recognition*, April 2004, p. 827–849.
- [19] S. Kawada, S. Sakai, N. Akahane, R. Kuroda e S. Sugawa, «A wide dynamic-range checkered-color CMOS image sensor with IR-cut RGB and Visible-to-Near-IR pixels,» in *IEEE Sensors Conference*, Christchurch, New, 2009.
- [20] S. Koyama, Y. Inaba, M. Kasano e T. Murata, «A day and night vision MOS imager with robust photonic crystal,» *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 55, pp. 754-759, 2008.

- [21] A. Guidi, R. Achanta, C. Fredembach e S. Susstrunk, «GUI-aided NIR and color image blending,» *MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pp. 1111 - 1116 , 26-28 April 2010.
- [22] J. Lyu, S. Choi e J. Choi, «IR/Color Composite Image Sensor with VIPS (Vertically Integrated Photodiode Structure),» in *International Image Sensor Workshop*, Ogunquit, Maine USA, June 7-10, 2007.
- [23] E. H. Moore, «On the reciprocal of the general algebraic matrix,» *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 26, pp. 394-395.