

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI ROMA TRE



Facoltà di Ingegneria

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica - XX ciclo

*"DALLE NANOSTRUTTURE AI SISTEMI"*

# CARATTERIZZAZIONE INTERFEROMETRICA DI STRUTTURE PLANARI VIBRANTI

Docente Guida:  
Prof. MASSIMO PAPPALARDO

Candidato:  
PHILIPP GATTA

Coordinatore:  
Prof. GENNARO CONTE

---

TRIENNIO ACCADEMICO 2004/2005 - 2006/2007



Ai miei genitori



# Indice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Indice</b>   | <b>v</b>  |
| <b>Introduzione</b>   | <b>ix</b> |
| <b>1 Trasduttori ultrasonici capacitivi microfabbricati (cMUT)</b>                                    | <b>1</b>  |
| 1.1 Caratteristiche generali . . . . .  | 2         |
| 1.2 Modellazione a parametri concentrati . . . . .  | 4         |
| 1.3 Tecnologia di fabbricazione: procedimento <i>Standard</i> e procedimento <i>Reverse</i> . . . . . | 5         |
| <b>2 Interferometria laser e sistemi LDV</b>  | <b>9</b>  |
| 2.1 Fondamenti di interferometria . . . . .   | 11        |
| 2.1.1 Interferometro di Mach-Zehnder . . . . .  | 11        |
| 2.1.2 Interferometro di Mach-Zehnder modificato . . . . .   | 14        |
| 2.1.3 Effetto Doppler e tecnica eterodina . . . . .   | 16        |
| 2.2 Demodulazione del segnale Doppler e limiti dei sistemi LDV  | 18        |
| 2.2.1 Conteggio delle Frange . . . . .  | 18        |
| 2.2.2 Demodulazione di Frequenza . . . . .  | 19        |
| 2.2.3 Demodulazione di Fase Analogica . . . . .   | 20        |
| 2.2.4 <i>Laser Speckle</i> . . . . .  | 20        |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>3</b> | <b>La stazione di misura</b>                                      | <b>23</b> |
| 3.1      | Descrizione della stazione di misura . . . . .                    | 24        |
| 3.1.1    | Specifiche del vibrometro Polytec MSV 300 . . . . .               | 29        |
| 3.2      | Interfacce di controllo . . . . .                                 | 32        |
| 3.3      | Standard IEEE 488 . . . . .                                       | 35        |
| 3.4      | Setup di misura . . . . .   | 37        |
| <b>4</b> | <b>Il software di controllo</b>                                   | <b>39</b> |
| 4.1      | Pacchetti software realizzati per la stazione di misura . . . . . | 39        |
| 4.1.1    | MCP software . . . . .  | 40        |
| 4.1.2    | TSA software . . . . .  | 42        |
| 4.1.3    | DSA software . . . . .  | 46        |
| 4.2      | Progetto del software . . . . .                                   | 48        |
| 4.2.1    | L'ambiente di sviluppo: LabVIEW 7.1 . . . . .                     | 48        |
| 4.2.2    | Architettura di comunicazione tra componenti software . . . . .   | 50        |
| 4.2.3    | Problemi affrontati in fase di progetto . . . . .                 | 51        |
| <b>5</b> | <b>Caratterizzazione ottica di trasduttori cMUT</b>               | <b>57</b> |
| 5.1      | Il nitruro di silicio nei trasduttori cMUT . . . . .              | 57        |
| 5.2      | Problemi di affidabilità del nitruro di silicio . . . . .         | 59        |
| 5.2.1    | <i>Electrical Breakdown</i> . Difetti locali. Void . . . . .      | 59        |
| 5.2.2    | Penetrazione di acqua nelle microcelle cMUT . . . . .             | 62        |
| 5.3      | Problemi nella litografia ottica . . . . .                        | 63        |
| <b>6</b> | <b>Caratterizzazione interferometrica di trasduttori cMUT</b>     | <b>67</b> |
| 6.1      | Mappa di deformazione . . . . .                                   | 68        |
| 6.2      | Analisi vibrazionale dell'intera superficie . . . . .             | 74        |
| 6.3      | Collasso . . . . .  | 80        |
| 6.4      | Spettro di spostamento . . . . .                                  | 83        |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>7</b> | <b>Caratterizzazione di differenti prototipi di trasduttori ultrasonici</b>   | <b>91</b>  |
| 7.1      | Caratterizzazione di trasduttori piezoelettrici lineari (collaborazione con <i>Esaote Pie Medical</i> - Maastricht, Olanda) . .   | 92         |
| 7.2      | Caratterizzazione di trasduttori capacitivi<br>MUMPs (collaborazione con <i>Istituto de Acustica-CSIC</i> - Madrid, Spagna) . . . . .   | 95         |
| 7.3      | Caratterizzazione di un trasduttore piezoelettrico per <i>Super Harmonic imaging</i> (collaborazione con <i>Thoraxcenter Biomedical Engineering Dep.</i> - Rotterdam, Olanda) . . . . . | 102        |
|          | <b>Conclusioni</b>  | <b>107</b> |
|          | <b>Bibliografia</b>   | <b>109</b> |
|          | <b>Bibliografia</b>   | <b>109</b> |



# Introduzione

Il primo a rendersi conto delle effettive potenzialità offerte dalle *micro* e *nano* tecnologie fu il fisico americano Richard Feynman il quale nel 1959 espose le sue idee in una famosa conferenza (*‘There’s plenty of room at the bottom’*) tenuta nell’annuale incontro della *American Physical Society*. Negli anni successivi al 1960, l’avvento delle tecnologie per la fabbricazione dei circuiti integrati fu il primo passo per lo sviluppo delle tecniche di microfabbricazione (*micromachining*) che permetteranno la realizzazione, nel 1989, dei primi microsistemi elettromeccanici (MEMS, acronimo di *Micro Electro-Mechanical Systems*): un’insieme di dispositivi di vario genere (meccanici, elettrici ed elettronici) integrati su uno stesso substrato di silicio, aventi sia proprietà opto-meccaniche che elettroniche.

Nell’ultimo decennio abbiamo assistito ad una crescita esponenziale dell’utilizzo dei MEMS nei più disparati settori della ricerca e dell’industria, indubbiamente alimentata dall’impiego di quest’ultimi in misura sempre maggiore nei prodotti di largo consumo, primi fra tutti, sensori per *airbag* e testine per stampanti *ink-jet*; al momento trovano applicazione in numerosi settori: automobilistico, elettronico, medico e militare.

Il mercato dei MEMS attualmente è uno dei più attraenti segmenti dell’industria dei semiconduttori, basti pensare che il fatturato mondiale si è attestato a 6 miliardi di dollari nel 2005 e per il 2010 si prevede che raggiungerà 10 miliardi [1]. Il motivo di questo successo è da imputare a diversi fattori tra cui: la possibilità di integrare circuiti elettronici e componen-

ti meccanici, la realizzazione di parti meccaniche estremamente piccole in maniera ripetibile. Ciò si traduce nella possibilità di produrre dispositivi miniaturizzati sempre più complessi riducendo notevolmente i costi.

A partire dai primi anni '90, alcuni gruppi di ricerca che si occupavano dello studio di trasduttori ultrasonici, cominciarono a valutare la possibilità di utilizzare la tecnologia MEMS per la realizzazione di trasduttori microfabbricati su silicio (MUT, acronimo di *Micromachined Ultrasonic Transducers*).

I trasduttori ultrasonici convenzionali, fin dalla loro nascita, sono stati sempre realizzati utilizzando materiali piezoelettrici di diverso tipo (cristalli piezoelettrici, piezoceramiche, materiali piezocomposti). Molte fasi del processo di fabbricazione non possono essere automatizzate essendo di tipo artigianale, in particolare le tecniche di taglio utilizzate per la realizzazione dei singoli elementi del dispositivo. Esistono pertanto forti limitazioni sia nella precisione meccanica, sia nella concreta possibilità di realizzare trasduttori di forma e dimensioni arbitrarie soprattutto nel caso di *array* 2-D. Le potenzialità offerte dall'utilizzo delle ormai collaudate tecnologie dei semiconduttori risiedono essenzialmente nella versatilità e nei costi di produzione, ovvero nella possibilità di realizzare trasduttori operanti anche a frequenze elevate (10-40 MHz) senza alcuna restrizione imposta da vincoli tecnologici.

Attualmente la più promettente alternativa ai convenzionali trasduttori piezoelettrici è rappresentata dai dispositivi cMUT (acronimo di *Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers*). Si tratta di trasduttori capacitivi microfabbricati su silicio costituiti da un gran numero di celle elettrostatiche connesse in parallelo tra loro. La singola microcella è un condensatore avente un elettrodo fisso (*backplate*) ed una sottile membrana metallizzata che costituisce l'elettrodo mobile. Le tecniche di *micromachining* consentono la realizzazione di membrane sottili, con diametro dell'ordine delle decine di micron e separate dall'elettrodo fisso da una distanza dell'ordine

del micron o inferiore la quale consente di sostenere campi elettrici molto elevati. Risulta pertanto possibile realizzare trasduttori ultrasonici con una buona efficienza di trasduzione, frequenza di risonanza anche molto elevata (40 MHz) ed una banda frazionale nelle applicazioni in acqua superiore al 100%.

Negli ultimi dieci anni l'aumento del livello di miniaturizzazione dei dispositivi MEMS ha evidenziato sempre più la necessità di disporre di adeguati strumenti di misura e test. Nel caso dei sensori ed attuatori convenzionali questa esigenza era legata principalmente al bisogno di avere strumenti adatti per lo studio dell'affidabilità, delle prestazioni e della durata di vita media di un prodotto. Nel caso dei dispositivi MEMS disporre di strumenti di misura opportuni diventa una priorità per comprenderne il reale comportamento operativo. I metodi di simulazione agli elementi finiti (FEM) non contemplano tutti gli aspetti fisici di un fenomeno, le condizioni al contorno potrebbero essere errate, i valori di alcune proprietà dei materiali strutturali possono variare considerevolmente a seconda della qualità del processo di fabbricazione. Possedere strumenti di misura adatti per analizzare la forma, la deformazione ed il comportamento vibrazionale dei trasduttori MEMS nonché conoscere i modelli fisici che descrivono il comportamento dei dispositivi, permette di ricavare con buona approssimazione le proprietà dei materiali strutturali impiegati. In questo modo è possibile controllare in maniera molto più accurata il progetto dei dispositivi e simulare il loro comportamento operativo. Un altro aspetto importante per comprendere la fattibilità dei trasduttori MEMS, migliorarne le prestazioni e l'affidabilità è il miglioramento dei processi tecnologici e dei materiali. Risulta pertanto di importanza strategica disporre di strumenti adeguati all'individuazione dei difetti strutturali e dei problemi più ricorrenti legati al processo tecnologico utilizzato ed alla qualità dei materiali strutturali impiegati per la fabbricazione dei dispositivi.

Un notevole sforzo è stato fatto nell'ultimo decennio per offrire alla

tecnologia MEMS strumenti di misura appropriati [2]. La maggior parte di essi è basata su metodi ottici quali: vibrometria laser Doppler (*Laser Doppler Vibrometry*), microscopia confocale (*confocal microscopy*), microscopia interferenziale (*interference microscopy*), tecniche di diffusione della luce (*light scattering*), interferometria Moirè (*Moirè Interferometry*), interferometria a reticolo (*Grating interferometry*), olografia digitale (*Digital Holography*), interferometria a granulosità (*SPeckle Interferometry*). Esistono pertanto in commercio molti strumenti adatti alla caratterizzazione dei dispositivi MEMS, ognuno di essi può trovare applicazione in uno specifico campo della ricerca a seconda della dimensione dei dispositivi, della frequenza di funzionamento, delle informazioni che si intende ricavare dalle misure.

Nel campo dei trasduttori ultrasonici, l'avvento dei cMUT ha evidenziato la necessità, come è successo per la maggior parte dei dispositivi MEMS, di strumenti di misura adeguati. Attualmente esistono sistemi adatti a tale scopo: sono concepiti per effettuare misure di vario genere su trasduttori MEMS convenzionali ma non soddisfano a pieno i requisiti richiesti per uno studio completo del comportamento vibrazionale dei trasduttori ultrasonici.

L'obiettivo della presente Tesi di Dottorato è la realizzazione di un sistema di misura ad interferometria laser che consenta una caratterizzazione completa dei trasduttori ultrasonici ed in particolare dei dispositivi cMUT. Le procedure di misura sono state appositamente studiate, per una analisi quanto più possibile automatizzata del comportamento vibrazionale di tali dispositivi, delle grandezze che ne caratterizzano il funzionamento, dei difetti strutturali derivanti dal processo di fabbricazione e/o dalla qualità dei materiali impiegati. La realizzazione di una stazione di misura di questo genere si prefigge l'obiettivo di migliorare le prestazioni nonché l'affidabilità dei dispositivi cMUT realizzati presso il laboratorio ACULAB (Dip. Ing. Elettronica, Università Roma Tre, Roma, Italia) in vista di una commer-

cializzazione futura.

Nel primo capitolo sono descritti brevemente i trasduttori capacitivi microfabbricati su silicio: le caratteristiche, il principio di funzionamento, il processo di fabbricazione, illustrando sia il procedimento *Standard* che quello *Reverse* sviluppato presso il citato laboratorio. Il secondo capitolo descrive i principi di funzionamento degli apparati interferometrici, le caratteristiche ed i limiti dei sistemi LDV (*Laser Doppler Vibrometry*), le tecniche comunemente usate per decodificare il segnale proveniente dall'interferometro ed estrarre l'informazione relativa allo spostamento e/o alla velocità di vibrazione dell'oggetto sotto indagine. Nel terzo capitolo viene descritta la stazione di misura realizzata illustrandone i componenti costitutivi e le interfacce utilizzate per gestire in remoto l'acquisizione e l'elaborazione dei dati in tempo reale nonché la visualizzazione del processo di scansione. Il quarto capitolo illustra i software realizzati, i pannelli di controllo, le funzionalità principali. Vengono descritti brevemente l'ambiente di sviluppo utilizzato, l'architettura di comunicazione tra i vari componenti software e alcune delle scelte effettuate per la soluzione dei problemi affrontati in fase di progetto. Il quinto capitolo è dedicato all'analisi dei problemi di affidabilità più ricorrenti riscontrati nelle normali condizioni operative dei trasduttori cMUT. Il capitolo sesto offre una panoramica sulle potenzialità della stazione di misura nella caratterizzazione del comportamento vibrazionale dei trasduttori cMUT, nella valutazione della qualità del processo tecnologico e dei materiali, nell'ottimizzazione dei modelli simulati (FEM). Infine nell'ultimo capitolo sono presentati i risultati delle misure effettuate, con il sistema sviluppato, per conto di alcune aziende e centri di ricerca europei al fine di valutare le prestazioni di prototipi di trasduttori ultrasonici, anche di tipo convenzionale (piezoelettrici), o realizzati con processi di fabbricazione diversi da quelli standard dei cMUT.

I risultati raggiunti nell'ambito di questa Tesi di dottorato sono stati presentati nel corso di congressi nazionali ed internazionali ed hanno con-

tribuito al deposito di brevetti nazionali ed internazionali. Questi lavori sono di seguito elencati.

### Congressi

- [C1] G. Caliano, P. Gatta, C. Longo, E. Cianci, V. Foglietti, A. Caronti, A. Savoia, and M. Pappalardo, “Laser-Vibrometry Techniques Applied to Capacitive Microfabricated Ultrasonic Transducers (cMUT)”, in: *Workshop LAVINYA (LAser VIbrometry Network: sYstems and Applications)*, Ancona, 2005.
- [C2] A. Savoia, G. Caliano, R. Carotenuto, C. Longo, P. Gatta, A. Caronti, E. Cianci, V. Foglietti, and M. Pappalardo, “Enhanced Echographic Images Obtained Improving the Membrane Structural Layer of the cMUT Probe”, in: *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Rotterdam, 2005.
- [C3] A. Caronti, A. Savoia, G. Caliano, R. Carotenuto, C. Longo, P. Gatta, and M. Pappalardo, “FEM Modeling of CMUT Arrays for Medical Imaging and Experimental Validation”, in: *7th Annual Ultrasonic Transducer Conference*, Marina del Rey (USA), 2005.
- [C4] Johann Le Floc’h, P. Gatta, G. Caliano, R. Carotenuto, and M. Pappalardo, “Calibrated Tomographic Schlieren System for Characterization of Medical Probes”, in: *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Rotterdam, 2005.
- [C5] P. Gatta, G. Caliano, A. Savoia, C. Longo, A. Caronti, V. Foglietti, and M. Pappalardo, “Tecniche di vibrometria laser applicate a trasduttori ad ultrasuoni microfabbricati su silicio (cMUT)”, in: *1° Conferenza per utilizzatori di vibrometri laser Polytec*, Parma, 2006.

- [C6] G. Caliano, A. Coppa, C. Longo, A. Caronti, A. Savoia, P. Gatta, F. Bertora, V. Foglietti, and M. Pappalardo, “A 7- $\mu\text{m}$  Thick cMUT Transducer Made by “Reverse” Technology for Echographic Imaging”, in: *5th MUT Workshop on Micromachined Ultrasound Transducers*, Munich, 2006.
- [C7] A. Savoia, G. Caliano, A. Caronti, R. Carotenuto, P. Gatta, C. Longo, V. Bavaro and M. Pappalardo, “Multilayer cMUT Structure for Improved Sensitivity and Bandwidth”, in: *5th MUT Workshop on Micromachined Ultrasound Transducers*, Munich, 2006.
- [C8] A. Caronti, G. Caliano, R. Carotenuto, P. Gatta, C. Longo, A. Savoia, and M. Pappalardo, “Acoustic Coupling in CMUT Arrays for Medical Imaging”, in: *5th MUT Workshop on Micromachined Ultrasound Transducers*, Munich, 2006.
- [C9] A. Octavio, P. Gatta, M. Dominguez, C. J. Martin, Y. Gomez-Ullate, O. Martinez, L. Gomez-Ullate and F. Montero de Espinosa, “Design and characterization of air coupled ultrasonic transducers based on MUMPS”, in: *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Vancouver (CANADA), 2006.
- [C10] A. Savoia, G. Caliano, A. Caronti, R. Carotenuto, P. Gatta, C. Longo and M. Pappalardo, “Multilayer cMUT Structure for Improved Sensitivity and Bandwidth”, in: *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Vancouver (CANADA), 2006.
- [C11] A. Caronti, C. Longo, A. Savoia, P. Gatta, G. Caliano and M. Pappalardo, “Analysis of Acoustic Interaction Effects and Crosstalk in CMUT Linear Arrays for Medical Imaging”, in: *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Vancouver (CANADA), 2006.

- [C12] G. Caliano, A. Savoia, A. Caronti, C. Longo, P. Gatta and M. Pappalardo, “Echographic Images Improvements with a cMUT Probe”, in: *ICA International Congress on Acoustics*, Madrid (SPAIN), 2007.
- [C13] A. Savoia, V. Bavaro, G. Caliano, A. Caronti, R. Carotenuto, P. Gatta, C. Longo and M. Pappalardo, “Crisscross 2D cMUT Array: Beamforming Strategy and Synthetic 3D Imaging Results”, in: *IEEE International Ultrasonics Symposium*, New York (USA), 2007.

### Brevetti

- [B1] A. Caronti, G. Caliano, A. Savoia, P. Gatta, M. Pappalardo, “Trasduttore capacitivo microfabbricato ad ultrasuoni (CMUT) a risonanze multiple per applicazioni di diagnostica medica a banda larga ed alta frequenza”, *Brevetto Europeo*, 2005.
- [B2] G. Caliano, M. Pappalardo, C. Longo, A. Savoia, P. Gatta, A. Caronti, “Metodo per la saldatura di trasduttori ad ultrasuoni di tipo capacitivo microlavorati su silicio (cMUT) e trasduttori piezoelettrici per sonde ecografiche diagnostiche”, *Brevetto Italiano*, 2005.
- [B3] A. Savoia, M. Pappalardo, G. Caliano, A. Caronti, P. Gatta, C. Longo, and V. Bavaro, “Bidimensional Ultrasonic Array for Volumetric Imaging”, *Brevetto Europeo*, 2007.

## Capitolo 1

# Trasduttori ultrasonici capacitivi microfabbricati (cMUT)

I trasduttori ultrasonici vengono classificati in base al meccanismo fisico utilizzato per convertire l'energia elettrica in energia ultrasonica e viceversa. I fenomeni fisici impiegati per generare e rilevare gli ultrasuoni sono la magnetostrizione, la piezoelettricità e la forza elettrostatica. I primi trasduttori acustici realizzati con materiali e cristalli piezoelettrici risalgono al 1917. L'idea di realizzare trasduttori elettrostatici era già stata considerata nel 1915 da Langevin [3], tuttavia l'impossibilità di disporre di campi elettrici molto elevati, per avere una buona efficienza di trasduzione, non rendeva conveniente la loro realizzazione. I primi trasduttori capacitivi, nella banda di frequenza udibile, sono stati i microfoni a condensatore: essi esistevano già dai primi anni del '900, tuttavia, solo negli anni '50 [4], sono stati realizzati dei prototipi funzionanti in aria a frequenze superiori a 20 kHz, anche se con bassa efficienza. Successivamente nel 1979 vengono realizzati trasduttori acustici capacitivi per applicazioni nei liquidi [5]. I progressi nel

campo della microelettronica e la nascita delle tecniche di *micromachining* hanno permesso la realizzazione dei primi prototipi di trasduttori elettrostatici microfabbricati su silicio alla fine degli anni '80 [6, 7]. Si tratta di dispositivi difficili da realizzare e con basse prestazioni. Nel 1994, Haller *et al.* [8] presentano il primo trasduttore ultrasonico capacitivo microfabbricato su silicio (cMUT) con prestazioni elevate e realizzato con i convenzionali processi di *micromachining*. Il miglioramento di tali processi permette di avere distanze tra gli elettrodi dell'ordine del micron o inferiori e quindi sostenere campi elettrici molto elevati. Attualmente i cMUT sono considerati una valida tecnologia, alternativa a quella dei trasduttori piezoelettrici, per la realizzazione di trasduttori ultrasonici. I principali vantaggi risiedono nella facilità di realizzare *array*, anche di tipo 2D, di forma e dimensioni arbitrarie, operanti a frequenze elevate (1-40 MHz) con una banda frazionale nelle applicazioni in acqua superiore al 100%. Un altro vantaggio è la possibilità di integrare circuiti elettronici sullo stesso substrato di silicio.

## 1.1 Caratteristiche generali

I trasduttori cMUT sono costituiti da una matrice di microcelle elettrostatiche connesse in parallelo fra loro, realizzate su un substrato di silicio utilizzando le tecniche di *surface micromachining*. La singola cella è un condensatore costituito da due elettrodi separati da una cavità. L'elettrodo fisso è vincolato ad un substrato rigido. L'elettrodo mobile è costituito da una membrana con una parte centrale metallizzata e ricoperta con un materiale protettivo (fig. 1.1). Il materiale strutturale, dielettrico, che costituisce la microcella, evita la possibilità di un cortocircuito tra i due elettrodi. Applicando una differenza di potenziale continua tra i due elettrodi, la quantità di carica accumulata su ciascuno di essi risulta essere uguale e di segno opposto. La forza risultante provoca una deflessione della membrana che si avvicina verso il substrato. A tale forza si oppone quella

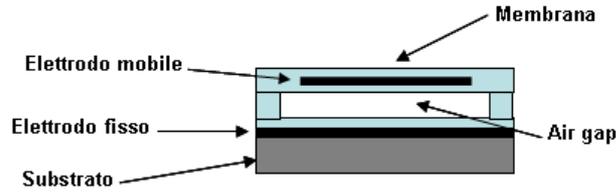


Figura 1.1: Rappresentazione schematica di una cella cMUT.

di richiamo elastica dovuta alla tensione meccanica intrinseca dello strato strutturale della membrana. Se quest'ultima viene messa in vibrazione da un'onda acustica incidente, si produce una modulazione della capacità della microcella rilevabile esternamente; se invece si vuole mettere in vibrazione la membrana è necessario sovrapporre alla polarizzazione una tensione elettrica alternata: in questo modo si ha la generazione di onde acustiche. L'impiego di una tensione di polarizzazione continua è necessario sia in ricezione, per rendere possibile il rilevamento di un segnale elettrico, sia in trasmissione per garantire un funzionamento lineare. Infatti, poichè la forza elettrostatica dipende dal quadrato della tensione applicata agli elettrodi, l'utilizzo di un'eccitazione sinusoidale alternata, senza alcuna tensione di polarizzazione, farebbe vibrare la membrana ad una frequenza doppia. Il circuito di polarizzazione utilizzato è mostrato in figura 1.2.

Si utilizza una resistenza  $R_B$ , di valore elevato, per polarizzare il cMUT con una tensione continua. La tensione alternata viene applicata attraverso una capacità  $C_B$ , di valore molto maggiore della capacità  $C_0$  del trasduttore. La funzione di  $C_B$  è quella di proteggere la sorgente di segnale  $V_{ac}$  dalla tensione continua.

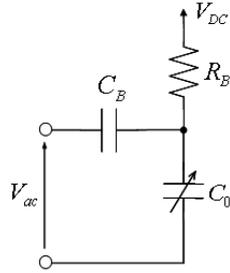


Figura 1.2: Circuito di polarizzazione di un trasduttore capacitivo.

## 1.2 Modellazione a parametri concentrati

Per un'analisi quantitativa del comportamento del trasduttore, consideriamo un modello schematico della microcella capacitiva del cMUT (fig. 1.3).

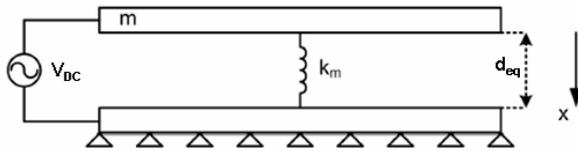


Figura 1.3: Modello a parametri concentrati di un cMUT.

Si può utilizzare il modello di condensatore a piatti piani e paralleli e supporre un movimento a pistone per la membrana. Per tener conto delle proprietà meccaniche di quest'ultima si considera l'elettrodo superiore dotato di una massa  $m$ , collegato all'elettrodo fisso inferiore tramite una molla avente costante elastica  $k_m$ . La forza elettrostatica dovuta alla tensione di polarizzazione  $V_{DC}$ , può essere espressa come [9]:

$$F_E = \frac{\epsilon_0 A V_{DC}^2}{2(d_{eq} - x)^2} \quad (1.1)$$

dove  $\epsilon_0$  è la costante dielettrica del vuoto,  $A$  è l'area degli elettrodi,  $d_{eq}$  è la distanza tra gli elettrodi nella posizione di riposo,  $x$  è lo spostamento della membrana nella direzione verticale. Supponendo che la forza di richiamo elastica della membrana abbia un andamento lineare con lo spostamento  $x$ , e considerando il caso in cui la tensione  $V$  non dipenda dal tempo, la posizione di equilibrio si ottiene risolvendo l'equazione:

$$\frac{\epsilon_0 A V_{DC}^2}{2(d_{eq} - x)^2} = k_m x \quad (1.2)$$

L'equazione 1.2 può essere ricondotta ad un polinomio di terzo grado che ammette tre soluzioni reali di cui una sola ha significato fisico in quanto corrisponde a  $x < d_{eq}$ . Le altre due corrispondono rispettivamente, ad un punto di equilibrio instabile, ed alla situazione priva di significato fisico  $x > d_{eq}$ . All'aumentare della tensione di polarizzazione, le tre soluzioni si avvicinano. Quando  $V_{DC}$  raggiunge la tensione di collasso ( $V_{coll}$ ), le tre soluzioni coincidono, in corrispondenza della posizione  $x_{coll} = d_{eq}/3$ . In tale punto la forza di richiamo elastica non è più in grado di controbilanciare la forza elettrostatica per cui l'elettrodo superiore collassa su quello inferiore:

$$V_{coll} = \sqrt{\frac{8k_m d_{eq}^3}{27\epsilon_0 A}} \quad (1.3)$$

$$x_{coll} = \frac{d_{eq}}{3} \quad (1.4)$$

Il fenomeno del collasso limita la massima tensione di polarizzazione applicabile al cMUT.

### 1.3 Tecnologia di fabbricazione: procedimento *Standard* e procedimento *Reverse*

Come accennato precedentemente, la realizzazione di un cMUT si basa sulle convenzionali tecniche di *surface micromachining*. Il dispositivo viene

fabbricato attraverso un certo numero di fasi successive che consentono di ottenere strutture complesse sovrapponendo diversi strati di film sottili: la forma geometrica desiderata viene ricavata utilizzando la litografia ottica. Il processo utilizzato presso il laboratorio ACULAB (Dip. Ing. Elettronica, Università Roma Tre, Roma, Italia) per la realizzazione dei dispositivi, utilizza il nitruro di silicio sia come materiale strutturale sia come strato protettivo della cella capacitiva. La deposizione avviene secondo la tecnica PECVD (deposizione chimica da fase vapore assistita da plasma) che permette di utilizzare temperature di processo basse (dell'ordine dei 350 °C). Questo consente di integrare l'elettronica CMOS standard sullo stesso chip del cMUT ed utilizzare l'alluminio come materiale per gli elettrodi. Tale materiale ha ottime caratteristiche elettriche ed è perfettamente compatibile con il processo PECVD. Le caratteristiche del nitruro di silicio verranno descritte nel capitolo 5.

Per la realizzazione degli *array* cMUT, il laboratorio ACULAB ha messo a punto due diversi tipi di procedimenti. Il procedimento *Standard* prevede la realizzazione del dispositivo partendo dall'ossidazione termica di un wafer di silicio e la deposizione fotolitografica di strati successivi (fig. 1.4). La struttura viene realizzata partendo dall'elettrodo inferiore e procedendo

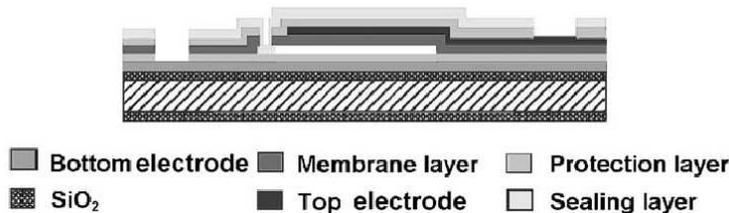


Figura 1.4: Struttura di un *array* cMUT realizzato con procedimento *Standard*.

verso l'alto fino alla realizzazione completa del trasduttore. La singola mi-

crocella risulta costituita da un elettrodo inferiore di cromo ed un elettrodo superiore di alluminio. Gli strati protettivi (*protection layer*), la membrana e la parte strutturale della cella sono di nitruro di silicio. La cavità al di sotto della membrana viene ricavata per attacco chimico del cromo sacrificale attraverso i fori presenti sul bordo della membrana. Successivamente tali fori sono sigillati con un'altro strato di nitruro di silicio (*sealing layer*).

Nel procedimento *Reverse* si utilizza un wafer di silicio coperto su entrambe le facce da uno strato di nitruro di silicio LPCVD. La struttura viene realizzata tramite deposizione fotolitografia di strati successivi, utilizzando alluminio come materiale per gli elettrodi. Gli strati protettivi (*protection layer*), la membrana e la parte strutturale della cella sono, anche in questo procedimento, di nitruro di silicio. La differenza risiede nel fatto che dopo la chiusura dei fori d'attacco la struttura non è completa: la parte del dispositivo, che nel procedimento *Standard*, rappresentava la parte attiva, nel caso del *Reverse* rappresenta la parte posteriore del dispositivo. Pertanto viene effettuata l'apertura dei *pad* e vengono realizzate le connessioni elettriche con il circuito di *front-end*. A questo punto del processo si fissa il *backing*; la struttura risultante è illustrata nella figura 1.5(a). L'ultimo passo prevede la completa rimozione del nitruro LPCVD e del silicio permettendo di liberare le membrane (fig. 1.5(b)). I vantaggi offerti dal procedimento *Reverse* risiedono nel fatto che la membrana è di nitruro di silicio LPCVD, i *pads* si trovano sul retro consentendo una più semplice connessione elettrica, inoltre i fori d'attacco si trovano nella parte posteriore e quindi non possono interferire sulla deformazione della membrana.

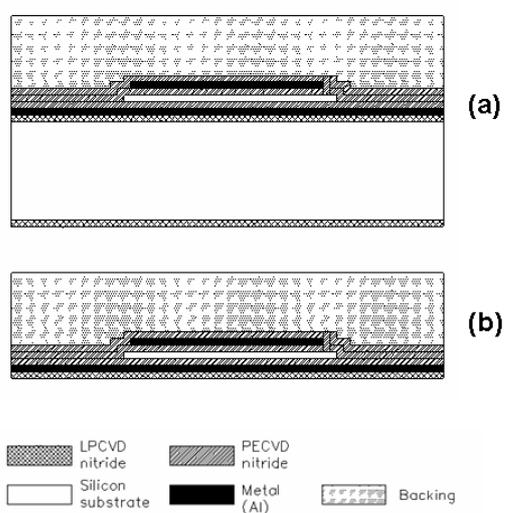


Figura 1.5: Struttura di un *array* cMUT realizzato con procedimento *Reverse*. Penultima (a) ed ultima (b) fase del processo.

## Capitolo 2

# Interferometria laser e sistemi LDV

Nella prima metà degli anni '60 l'interferometria laser comincia ad affermarsi come tecnica non intrusiva per l'analisi di superfici vibranti con ampiezze comprese tra 0.1 e 6000 Å nell'intervallo di frequenza da 100 Hz a 20 kHz [10, 11]. Il *setup* prevede l'utilizzo di un interferometro di Michelson ed una sorgente laser ad emissione continua. I vantaggi offerti sono molteplici: la natura non intrusiva della misura permette di analizzare il comportamento vibrazionale di trasduttori acustici attraverso una scansione della superficie tramite un fascio laser. In questo modo la misurazione viene eseguita senza l'aggiunta di nessuna massa alla struttura in esame e quindi senza alterare le proprietà acustiche della superficie vibrante. Altro vantaggio deriva dal fatto che l'analisi viene effettuata a distanza e quindi rende possibile l'esecuzione di misurazioni in liquidi ed in aree difficilmente accessibili. Le limitazioni presentate dalle tecniche interferometriche omodina consistono nella possibilità di rilevare vibrazioni di superfici con ampiezza superiore a 250 Å solo nel caso di strutture con moto puramente sinusoidale. Un decisivo passo avanti è stato fatto nel 1970 da Eberhardt ed Andrews [12],

con il primo sistema laser di tipo eterodina per la misura e l'analisi delle vibrazioni. Negli anni successivi l'utilizzo della tecnica laser Doppler per l'analisi di superfici vibranti prende il nome di *Laser Doppler Vibrometry* (LDV). Ulteriori sviluppi interessanti sono stati l'introduzione nel 1985 del primo sistema LDV dotato di fibra ottica [13]. Si tratta ancora di strumenti con bassa sensibilità e basso rapporto segnale/rumore (SNR): le misurazioni sono possibili solo in condizioni di elevata riflessività della superficie.

Attualmente i sistemi LDV trovano applicazione in moltissimi campi e consentono l'analisi di vibrazioni di strutture di diversa natura e dimensioni [14]. Specialmente nel settore dei MEMS, rappresentano una tecnica di misura privilegiata per le loro caratteristiche: non intrusività, elevate prestazioni (banda di lavoro fino a 30 MHz; elevata risoluzione: rilevare spostamenti di ampiezza inferiore ad 1 pm), possibilità di misurare spostamenti o velocità in tempo reale. Il primo sistema commerciale di vibrometria laser adatto alla caratterizzazione dei MEMS è stato realizzato nel 2000 dalla Polytec (Polytec GmbH, Waldbronn, Germany) [15]. Si tratta di un sistema LDV a scansione (SLDV): permette di eseguire la misura in un punto qualsiasi della superficie all'interno dell'area visibile dalla videocamera muovendo lo *spot* del laser in un tempo inferiore a 10 ms. La possibilità di eseguire misurazioni in tempi brevi con elevata risoluzione spaziale lo rendono uno strumento particolarmente adatto allo studio del comportamento vibrazionale dei MEMS.

Nell'ultimo decennio l'interferometria laser Doppler è diventata una tecnica di misura molto valida per la caratterizzazione dei trasduttori acustici: i motivi di tale successo risiedono non soltanto nelle caratteristiche già elencate precedentemente ma anche nella praticità di non dover eseguire frequentemente la calibrazione e nel fatto di non disturbare il campo ultrasonoro generato dal trasduttore.

Questo capitolo illustra i principi di funzionamento degli apparati interferometrici basati sullo schema Mach-Zehnder. Verranno descritti inoltre il

principio Doppler e la tecnica ottica eterodina (par. 2.1.3) per comprendere come sia possibile estrarre l'informazione relativa allo spostamento e/o alla velocità di vibrazione dell'oggetto sotto indagine e determinarne il verso del moto. Il paragrafo 2.2, oltre a descrivere brevemente le tecniche più comunemente usate nei sistemi LDV per decodificare il segnale proveniente dall'interferometro, illustra l'effetto *speckle* che rappresenta una delle più significative limitazioni nelle misure di deformazione su superfici con bassa riflessività quando si utilizzano sistemi LDV dotati di fibra ottica.

## 2.1 Fondamenti di interferometria

L'interferometria ottica permette la misura di spostamenti molto inferiori alla lunghezza d'onda della luce sfruttando la relazione sinusoidale che lega l'uscita dell'interferometro e la differenza tra la lunghezza dei cammini ottici percorsi dai suoi raggi: il moto della superficie d'interesse è in grado di modulare la differenza di cammino ottico rispetto al fascio di riferimento che si traduce in una differenza di fase proporzionale alla velocità del bersaglio, in tal modo l'interferometro può essere utilizzato per rilevare segnali di vibrazione di ampiezza inferiore al nanometro.

L'interferenza è un fenomeno rilevabile quando due raggi di luce, emessi dalla stessa sorgente, si sommano in un determinato punto. L'intensità risultante varia sinusoidalmente con la differenza di fase relativa fra i due raggi. La situazione di interferenza descritta può essere creata artificialmente nella maniera indicata dalla configurazione denominata interferometro di Mach-Zehnder.

### 2.1.1 Interferometro di Mach-Zehnder

L'interferometro di Mach-Zehnder appartiene alla categoria di interferometri a "divisione di fascio". Questo nome vuole sottolineare il fatto che, al fine di generare due sorgenti di luce tra loro coerenti, si adotta l'artificio di

dividere un fascio di luce prodotto da una sorgente di radiazione coerente (ad esempio un laser ad emissione continua operante alla lunghezza d'onda  $\lambda = 633nm$ ) in due porzioni di pari intensità mediante l'utilizzo di una lamina parzialmente riflettente. I due fasci di luce così generati possono essere considerati come se fossero prodotti da due sorgenti di radiazione tra loro coerenti. Con riferimento allo schema di principio dell'interferometro di Mach-Zehnder (fig. 2.1), i due fasci di luce secondari vengono prodotti da un *Polarizing Beam Splitter* (PBS1) ed inviati mediante due specchi (M1 ed M2) verso una lamina semiriflettente (*Beam Splitter* BS2) la quale divide ulteriormente i fasci di luce in parti uguali relativamente all'intensità. Come risultato, sui fotorivelatori si avrà la sovrapposizione di parte

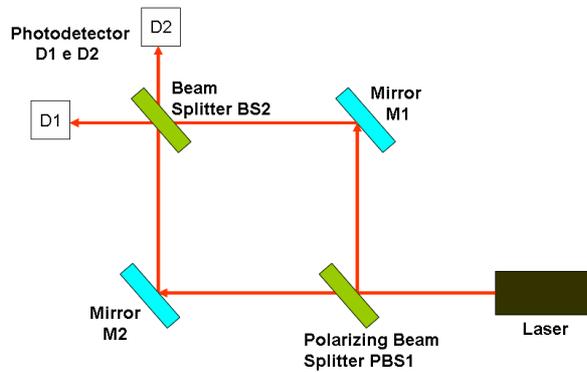


Figura 2.1: Interferometro di Mach-Zehnder.

dei campi elettromagnetici associati ai due raggi luminosi. Nel caso in cui la differenza di cammino ottico percorso dai due fasci prima di giungere su uno dei fotorivelatori è inferiore alla lunghezza d'onda della sorgente di radiazione principale, si produrranno delle frange di interferenza, ovvero bande alternativamente buie e luminose dovute all'interferenza rispettivamente distruttiva e costruttiva della luce laser.

Utilizzando la rappresentazione complessa per descrivere l'onda lumi-

nosa  $a_0$  prodotta dal laser, si può scrivere [16]:

$$a_0 = Ae^{i\omega t} \quad (2.1)$$

dove  $A = \sqrt{I}$  è l'ampiezza del campo,  $\omega$  è la pulsazione,  $t$  è il tempo. Sia  $I$  l'intensità in uscita del laser.

Ogni fascio che colpisce uno dei fotorivelatori, ad esempio D2, avrà un'ampiezza ridotta di un fattore due rispetto al fascio emesso dal laser (questo a causa della doppia separazione operata da PBS1 e BS2) ed avrà subito una variazione di fase determinata dalla distanza da esso percorsa. Pertanto le due ampiezze che interferiscono sulla superficie di D2 possono essere descritte dalle equazioni:

$$a_1 = \frac{1}{2}Ae^{i(\omega t - \theta_1)} \quad (2.2)$$

$$a_2 = \frac{1}{2}Ae^{i(\omega t - \theta_2)} \quad (2.3)$$

La relazione fra il cammino geometrico  $z_i$  percorso dal fascio e la variazione di fase  $\theta_i$  è la seguente:

$$\theta_i = 2\pi \frac{z_i}{\lambda} \quad (2.4)$$

dove  $\lambda$  rappresenta la lunghezza d'onda del laser.

L'ampiezza totale del campo in D2 sarà data dalla somma delle singole ampiezze  $a_1$  e  $a_2$ :

$$a_{tot,D2} = a_1 + a_2 \quad (2.5)$$

È noto che i fotorivelatori (incluso l'occhio umano) rispondono all'intensità della luce rilevata piuttosto che all'ampiezza del campo. L'intensità  $I$  può essere calcolata moltiplicando l'ampiezza  $a$  per il suo complesso coniugato  $a^*$ :

$$I = a \cdot a^* \quad (2.6)$$

Sostituendo l'Eq.(2.5) nella Eq.(2.6) otteniamo l'intensità  $I_{D2}$  presso il rivelatore D2:

$$I_{D2} = a_{tot,D2} \cdot a_{tot,D2}^* \quad (2.7)$$

In alternativa è possibile esprimere  $I_{D2}$  utilizzando l'Eq.(2.2) e l'Eq.(2.3), ottenendo:

$$I_{D2} = \frac{1}{2} A^2 [1 + \cos(\theta_2 - \theta_1)] \quad (2.8)$$

L'intensità  $I_{D1}$  presso il rivelatore D1 si può ricavare applicando il principio di conservazione dell'energia. Infatti la somma delle intensità dei due fasci laser all'uscita di BS2 dovrà essere pari all'intensità totale del fascio laser  $a_0$ , ovvero  $A^2$ . Pertanto  $I_{D1}$  deve valere:

$$I_{D1} = \frac{1}{2} A^2 [1 - \cos(\theta_2 - \theta_1)] \quad (2.9)$$

Utilizzando l'Eq.(2.4) possiamo esprimere la differenza di fase  $\Delta\theta$  che i due fasci hanno quando arrivano in D1 o D2, in termini della differenza  $\Delta z$  di cammino ottico percorso:

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (z_2 - z_1) = 2\pi \cdot \frac{\Delta z}{\lambda} \quad (2.10)$$

Le equazioni (2.9) e (2.8) insieme alla (2.10) mostrano che un semplice interferometro Mach-Zehnder può essere utilizzato per misurare la differenza  $\Delta z$  di cammino ottico percorso da due fasci di luce.

### 2.1.2 Interferometro di Mach-Zehnder modificato

Lo schema classico dell'interferometro di Mach-Zehnder illustrato in figura 2.1 non permette di far interagire un oggetto esterno (*target*) con il fascio laser in maniera tale da convertire il suo movimento in una differenza di fase misurabile. Per raggiungere tale scopo è necessario considerare uno schema modificato dell'interferometro di Mach-Zehnder come quello in figura 2.2 nel quale lo specchio M2 è stato sostituito da un divisore di fascio

polarizzatore PBS2 ed una lamina ad un quarto d'onda QWP (*Quarter-Wave Plate*).

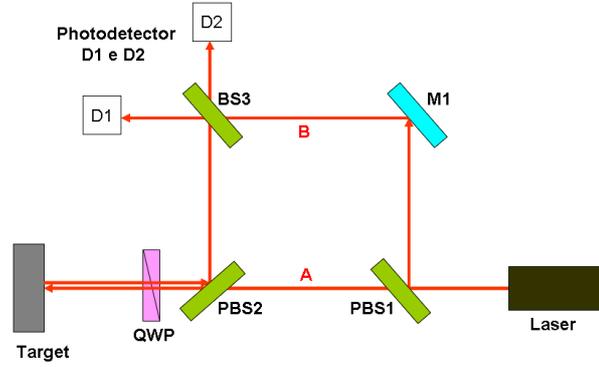


Figura 2.2: Interferometro di Mach-Zehnder modificato.

Il fascio proveniente dal laser viene separato in due fasci dal *beam-splitter* PBS1, ed uno di questi viene direzionato sul bersaglio (*target*) attraverso PBS2. I due elementi PBS2 e QWP svolgono la funzione di accoppiatore direzionale: il fascio riflesso dal bersaglio torna indietro attraversando la lamina QWP e viene direzionato da PBS2 interamente su BS3.

Le relazioni (2.8), (2.9) e (2.10) sono ancora valide. Se assumiamo la cella interferometrica “interna” perfettamente simmetrica, la differenza di fase interna tra il fascio A che attraversa PBS1 e PBS2 ed il fascio di riferimento B è nulla: l’unica differenza di fase è quella prodotta dal percorso esterno del fascio A, da PBS2 al target. Detto L tale cammino, la differenza di fase  $\Delta\theta$  si può esprimere utilizzando l’Eq.(2.10):

$$\Delta\theta = 4\pi \cdot \frac{L}{\lambda} \quad (2.11)$$

Ottenuta ricordando che  $\Delta z$  ora rappresenta il percorso del fascio A da PBS2 al *target* e di nuovo a PBS2 e pertanto vale  $2L$ .

### 2.1.3 Effetto Doppler e tecnica eterodina

Se il bersaglio si muove verso QWP (ovvero, nel caso di un vibrometro laser, verso la *sensor head*) ad una velocità costante  $v$ , lo spazio  $L$  percorso dal laser si può esprimere in funzione del tempo:

$$L = v \cdot t \quad (2.12)$$

dove è stata omessa la costante  $L_0$  che rappresenta la posizione del target all'istante  $t = 0$ .

Utilizzando l'Eq.(2.12) è possibile esprimere la differenza di fase  $\Delta\theta$  in funzione del tempo:

$$\Delta\theta = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot vt = 2\pi \cdot \frac{2v}{\lambda} \cdot t = 2\pi \cdot f_D \cdot t \quad (2.13)$$

dove  $f_D = \frac{2v}{\lambda}$  è la frequenza Doppler.

A questo punto appare chiaro il principio di funzionamento dell'interferometro di Mach-Zehnder modificato: il movimento del bersaglio modula la differenza di cammino  $\Delta z$  rispetto al fascio B di riferimento, che si traduce in una differenza di fase  $\Delta\theta$  proporzionale alla velocità  $v$  del bersaglio. Sostituendo l'Eq.(2.13) nelle (2.8) e (2.9) si ricava:

$$I_{D1} = \frac{1}{2}A^2[1 + \cos(2\pi f_D t)] \quad (2.14)$$

$$I_{D2} = \frac{1}{2}A^2[1 - \cos(2\pi f_D t)] \quad (2.15)$$

Tali espressioni evidenziano l'impossibilità, da parte dei fotorivelatori, di stabilire la direzione del moto del *target*. Infatti l'intensità da essi rilevata avrà lo stesso valore sia se  $f_D$  è positiva sia se è negativa.

Solitamente nei sistemi LDV per riconoscere il verso del moto si utilizza un modulatore ottico a cella di Bragg collocato nel braccio di riferimento dell'interferometro come mostrato nella figura 2.3.

La cella di Bragg è un tipo di modulatore acustoottico che trasla la

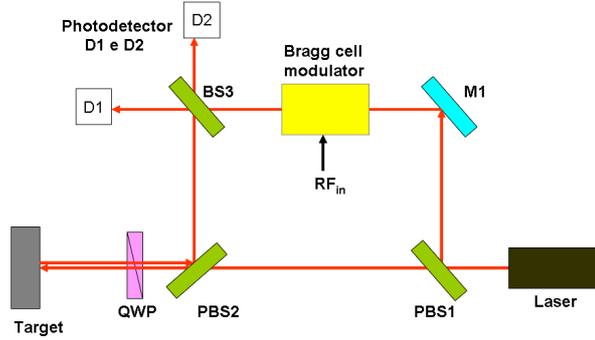


Figura 2.3: Interferometro di Mach-Zehnder modificato, con cella di Bragg.

frequenza del fascio che la attraversa di una quantità  $f_B$  determinata da un segnale di pilotaggio RF (tipicamente pari a 40 MHz oppure 70 MHz [17]). Questo provoca uno scorrimento delle frange d'interferenza alla frequenza della portante RF. Tenendo in considerazione questo effetto, le relazioni (2.14) e (2.15) assumono la forma:

$$I_{D1} = \frac{1}{2} A^2 \{1 + \cos [2\pi(f_B + f_D)t]\} \quad (2.16)$$

$$I_{D2} = \frac{1}{2} A^2 \{1 - \cos [2\pi(f_B + f_D)t]\} \quad (2.17)$$

Pertanto i fotorivelatori 'vedono' la frequenza  $f_{out}$ :

$$f_{out} = f_B + f_D = f_B + \frac{2v}{\lambda} \quad (2.18)$$

Ogni movimento del *target* si tramuta in una deviazione di  $f_{out}$  dal suo valore di riposo  $f_B$ . Tale variazione dipenderà dal verso del moto, ovvero dal segno di  $v$ , pertanto i fotorivelatori sono in grado di determinare facilmente il verso del moto. Gli interferometri che permettono di determinare la direzione del moto del *target* utilizzando la tecnica di sovrapposizione di fasci laser a frequenza diversa, sono chiamati interferometri di tipo "eterodina".

## 2.2 Demodulazione del segnale Doppler e limiti dei sistemi LDV

Considerando le equazioni (2.11) e (2.13) appare evidente che esiste una relazione lineare tra la differenza di fase e lo spostamento istantaneo del *target*. La modulazione di fase genera nel contempo una modulazione di frequenza determinata dalla velocità  $v$  del bersaglio e dalla frequenza di vibrazione  $f_{vib}$ . La larghezza di banda del segnale modulato in frequenza può essere calcolata con la semplice espressione:

$$BW_{het} = 2(f_D + f_{vib}) \quad (2.19)$$

Pertanto la  $BW_{het}$  dipende non soltanto dalla velocità ma anche dalla frequenza di vibrazione [17], inoltre la frequenza  $f_B$  della cella di Bragg deve essere almeno pari ad  $f_D + f_{vib}$ . I sistemi LDV in commercio hanno solitamente una sorgente laser HeNe operante alla lunghezza d'onda di 633 nm ed una cella di Bragg con  $f_B$  pari a 40 MHz. Tali specifiche consentono di misurare velocità fino a 10 m/s con  $f_{vib}$  inferiori ad 8 MHz oppure velocità fino a 3 m/s con  $f_{vib}$  fino a 30 MHz.

Le tecniche utilizzate nell'ambito dei sistemi LDV per decodificare il segnale proveniente dall'interferometro ed estrarre l'informazione relativa allo spostamento e/o alla velocità istantanea del target sono: "Conteggio delle Frange" (*Fringe Counting*), "Demodulazione di Frequenza" (*Frequency Demodulation*), "Demodulazione di Fase Analogica" (*Analog Phase Demodulation*).

### 2.2.1 Conteggio delle Frange

Il più semplice e classico metodo per ricavare l'informazione sullo spostamento è quello che si basa sul conteggio delle frange di interferenza. Considerando lo schema di figura 2.2, i due fasci laser che interagiscono, ad esempio, sulla superficie del fotorivelatore D2 (la stessa figura di interfe-

renza si forma anche sul fotorivelatore D1) creano su di esso delle frange di interferenza, ovvero bande alternativamente buie e luminose dovute all'interferenza rispettivamente distruttiva e costruttiva della luce laser. È possibile determinare l'ampiezza dello spostamento del *target* in movimento a partire dal conteggio delle frange di interferenza rilevate dai fotorivelatori. Il conteggio permette di effettuare misure con una risoluzione spaziale di  $\lambda/2$ , pertanto se lo spostamento che si intende misurare non è multiplo intero di mezza lunghezza d'onda, la misura sarà affetta da errore.

I vantaggi principali della tecnica del "Conteggio delle Frange" sono da un lato la possibilità di effettuare misure su un intervallo in linea di principio illimitato, dall'altro che il procedimento è completamente digitale e quindi non richiede alcuna calibrazione. La risoluzione di questa tecnica di misura può essere aumentata fino a  $\lambda/80$  (ovvero circa 8 nm con un laser funzionante a  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) mediante un appropriato processo di interpolazione chiamato *phase multiplication*. È importante sottolineare il fatto che il "Conteggio delle Frange" può essere utilizzato per misure di spostamento nell'intervallo di frequenza fino a 250 KHz, pertanto questa tecnica non è adatta per applicazioni ultrasoniche a banda larga.

### 2.2.2 Demodulazione di Frequenza

Questa tecnica di elaborazione prevede l'utilizzo di un demodulatore FM per ottenere un segnale analogico di tensione proporzionale alla velocità istantanea di vibrazione del *target*. Il limite più significativo imposto dall'utilizzo di tale stadio è lo sfavorevole SNR che non permette di realizzare decodificatori con larghezza di banda superiore a 10 MHz. D'altro canto questa tecnica di demodulazione può essere vantaggiosamente utilizzata per rilevare vibrazioni di ampiezza qualsiasi ed è particolarmente indicata quando si è interessati a misurare spostamenti del *target* ad alta velocità (10m/s).

### 2.2.3 Demodulazione di Fase Analogica

Come nella tecnica del “Conteggio delle Frange” è possibile ricavare l’informazione relativa allo spostamento del *target* direttamente dalla fase del segnale prodotto dall’interferometro; l’unica differenza risiede nel fatto che con il conteggio delle frange è possibile misurare spostamenti con una risoluzione di  $\lambda/2$  mentre con la tecnica di “Demodulazione di Fase Analogica” la risoluzione è teoricamente illimitata e la banda di lavoro del vibrometro è limitata soltanto dalla frequenza  $f_B$  utilizzata nell’interferometro.

La presente tecnica risulta essere la più adatta nello studio di vibrazioni ultrasoniche fino a 30 MHz. L’unica limitazione sostanziale risiede nella massima variazione di fase rilevabile che è limitata nell’intervallo  $\pm 90^\circ$ : questa corrisponde ad uno spostamento massimo di circa  $\pm 79$  nm (158 nm<sub>pp</sub>). Infatti se  $\Delta\theta = \pm \pi/2$  ed il laser utilizzato ha  $\lambda = 633$  nm, in base alla Eq.(2.11) abbiamo:

$$\pm \frac{\pi}{2} = 4\pi \cdot \frac{L_{max}}{\lambda} \Rightarrow L_{max} = \pm \frac{\lambda}{8} \cong \pm 79 \text{ nm} \quad (2.20)$$

Spostamenti più grandi del valore  $L_{max}$  non possono essere demodulati perchè causano variazioni di fase maggiori di  $90^\circ$ .

### 2.2.4 Laser Speckle

Una delle limitazioni più rilevanti dei sistemi LDV, specialmente quelli dotati di fibra ottica, è rappresentata dall’effetto *Speckle* [18] e dal basso SNR che deriva nel caso di misurazioni effettuate su superfici con elevata rugosità e quindi con bassa riflessività. Quando un fascio di luce coerente interagisce con una superficie irregolare (altezza massima nella zona illuminata dallo spot del laser maggiore di mezza lunghezza d’onda) genera una figura di interferenza prodotta dalla sovrapposizione di molte onde coerenti ma con fase casuale. La sovrapposizione della figura di interferenza con il segnale utile contenente la frequenza Doppler può dar luogo a disturbi che non per-

mettono la demodulazione al fine di ricavare l'informazione sulla velocità o sullo spostamento della superficie: tale effetto si accentua particolarmente nel caso in cui il *target* sia caratterizzato da una componente di movimento *in-plane*. Il fenomeno dovuto al rumore *speckle* prende il nome di *drop-out*. Pertanto, la possibilità di rilevare vibrazioni di piccola ampiezza, soprattutto nel caso dei MEMS in cui è richiesta una elevata risoluzione, dipende fortemente dalla riflessività della superficie in esame.



## Capitolo 3

# La stazione di misura

A partire dalla prima metà degli anni '90 alcuni gruppi di ricerca cominciarono ad utilizzare sistemi LDV dotati di fibra ottica per la ricerca nel campo dei MEMS [19, 20]. Nel 1999 furono presentati i primi lavori, realizzati con sistemi a scansione (SLDV), riguardanti la caratterizzazione del comportamento vibrazionale di microstrutture [21, 22]. Attualmente i sistemi MSV (*Microscope Scanning Vibrometer*) sono considerati lo strumento più adatto per misurare lo spostamento o la velocità istantanea di superfici con vibrazioni *out-of-plane*, ovvero considerando il laser ortogonale alla superficie del campione, le vibrazioni devono avvenire nella stessa direzione del fascio laser. Come accennato nel cap. 2, il primo strumento MSV di tipo commerciale fu realizzato nel 2000 dalla Polytec (MSV-300) [15] ma non era fornito di alcun software per la scansione automatica della superficie. Il primo software completo per la caratterizzazione di MEMS fu realizzato nel 2002. Tale programma fu utilizzato con successo per lo studio di microspecchi ed accelerometri [23] ma prevedeva delle limitazioni riguardo al numero di misure per unità di area ed all'estensione della superficie di scansione. Il crescente interesse dell'industria dei MEMS verso i sistemi MSV ha incoraggiato le aziende del settore a produrre strumenti di misura sempre più sofisticati. Al momento l'MSA-400 (Polytec) rappresenta il miglior siste-

ma commerciale per la caratterizzazione interferometrica di microstrutture. Tale strumento nonostante le notevoli funzionalità, più che sufficienti per lo studio della maggior parte dei dispositivi MEMS, presenta diverse limitazioni per l'utilizzo nella caratterizzazione dei cMUT. Infatti l'area di scansione non permette di esaminare l'intera superficie del trasduttore ed inoltre, nel caso di trasduttori ultrasonici, lo studio completo del comportamento vibrazionale richiede la realizzazione di procedure appositamente studiate per estrarre le informazioni desiderate ai fini dell'ottimizzazione dei modelli simulati e della valutazione della qualità del processo di fabbricazione.

La stazione di misura realizzata in questo lavoro di Tesi rappresenta uno strumento unico nel suo genere per la caratterizzazione interferometrica di trasduttori cMUT nonché per lo studio di generici trasduttori ultrasonici con vibrazioni *out-of-plane*.

Nel presente capitolo sono descritti gli strumenti del sistema di misura e le interfacce utilizzate per gestire in remoto l'acquisizione e l'elaborazione dei dati in tempo reale nonché la visualizzazione del processo di scansione.

### 3.1 Descrizione della stazione di misura

La figura 3.1 mostra la stazione di misura realizzata presso il laboratorio ACULAB nell'ambito di questo lavoro di Tesi. Gli strumenti costitutivi sono stati scelti in base alle esigenze richieste per effettuare misure interferometriche su generici dispositivi MEMS. In particolare è possibile misurare la deformazione di strutture operanti a frequenze comprese tra 50 kHz e 20 MHz, con spostamenti massimi di  $\pm 75$  nm ( $150$  nm<sub>pp</sub>) e velocità massima di 6 m/s. L'estensione della superficie di scansione e la risoluzione spaziale (che dipende dal diametro dello *spot* del laser) variano a seconda del tipo di obiettivo ottico utilizzato per il microscopio. L'area di misura minima è quella corrispondente ad un obiettivo 50x ( $207 \times 155$   $\mu$ m) che

produce uno *spot* di diametro  $1\ \mu\text{m}$ ; l'area massima corrisponde all'obiettivo 1.6x ( $6480 \times 4860\ \mu\text{m}$ ) che produce uno *spot* di diametro  $31.25\ \mu\text{m}$ .

Nel caso di misure su trasduttori MEMS spesso è richiesta una elevata risoluzione ma nel contempo la superficie di interesse può avere dimensioni dell'ordine del centimetro: per soddisfare tale esigenza il microscopio è stato dotato di un piano motorizzato (piano x-y) che permette di estendere l'area di scansione su un'area di  $108 \times 71\ \text{mm}$  conservando tuttavia una elevata risoluzione se si utilizzano obiettivi con un fattore di ingrandimento 20x oppure 50x.

È possibile monitorare in tempo reale il processo di scansione mediante una videocamera contenuta in un adattatore montato sul microscopio. Quest'ultimo è stato fornito di un controllo di messa a fuoco motorizzato (asse z) con una risoluzione di  $2\ \text{nm}$ .

Si utilizza un generatore di funzioni per eccitare il dispositivo MEMS alla frequenza desiderata ed un oscilloscopio per acquisire in tempo reale il segnale in uscita dal vibrometro: esso rappresenta lo spostamento istantaneo della superficie nel punto in cui è posizionato lo *spot* del laser.

Il computer è il nodo di collegamento centrale della stazione di misura: permette l'interfacciamento con tutte le periferiche esterne, gestisce l'acquisizione e l'elaborazione dei dati in tempo reale nonché la visualizzazione del processo di scansione.

Di seguito sono elencati i componenti della stazione di misura con una breve descrizione:

- **Vibrometro Polytec MSV 300** (Polytec GmbH, Waldbronn, Germany), a sua volta composto dalle seguenti unità:
  - Controllore di scansione (*Scanner Controller MSV-Z-040*): è il punto di connessione centrale tra il vibrometro ed il computer; provvede all'interfacciamento del pc con la videocamera montata sul microscopio e con l'unità di scansione.
  - Adattatore per microscopio (*Microscope Adapter OFV-074*): con-

### 3. La stazione di misura

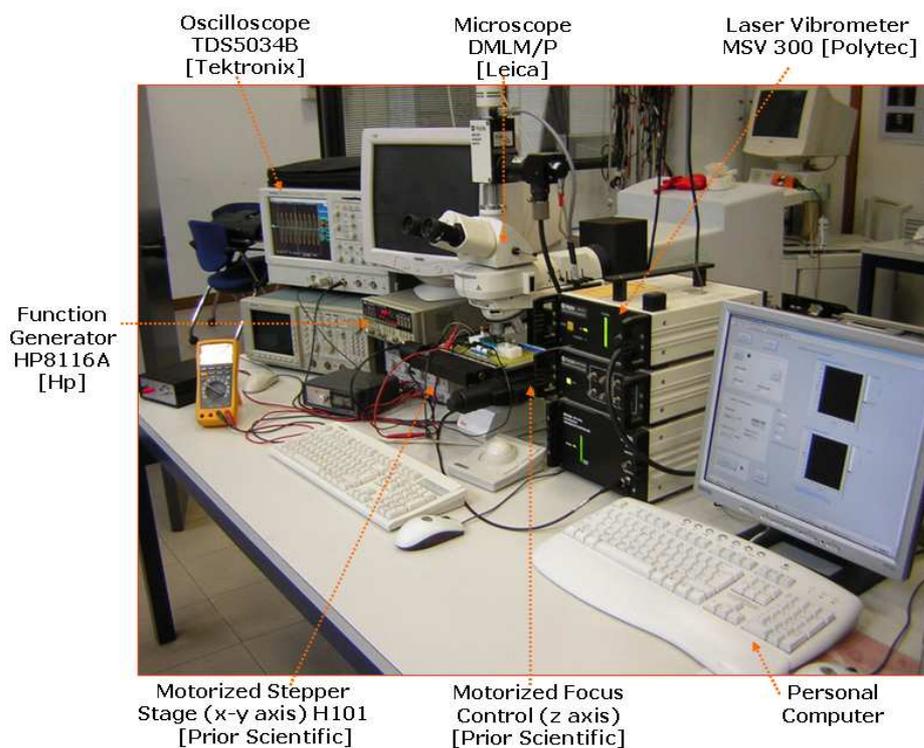


Figura 3.1: La stazione di misura presso il laboratorio ACULAB

tiene una videocamera PAL CCD per la visualizzazione dell'oggetto sotto misura ed un sistema di filtraggio per ridurre l'intensità dello *spot* del laser nel caso in cui si osservi una superficie con elevata riflessività.

- Unità di scansione (*Scanner Unit* OFV-073): contiene i trasduttori di spostamento piezoelettrici che permettono la deflessione del fascio laser con un angolo di  $\pm 20^\circ$  rispetto alla verticale. Questo consente la scansione del fascio laser nel piano x-y sull'intera area visibile dalla videocamera. Tale area dipende ovviamente dal tipo di obiettivo

utilizzato (vedi tabella 3.4).

- Unità interferometrica (*Sensor Head* OFV-511): contiene l'interferometro che è collegato tramite fibra ottica alla unità di scansione. La sorgente laser He-Ne ha una lunghezza d'onda di 633 nm ed una potenza d'uscita inferiore ad 1 mW. Lo schema di funzionamento dell'unità interferometrica si basa sulla versione modificata dell'interferometro di Mach-Zehnder con cella di Bragg per riconoscere il verso del moto (fig. 2.3).

- Controllore del vibrometro (*Vibrometer controller* OFV 2700-2): decodifica il segnale proveniente dall'unità interferometrica. È possibile utilizzare un *displacement decoder* (OVD-30) oppure un *velocity decoder* (OVD-05). Per la stazione di misura è stato scelto il modulo OVD-30: esso fornisce in uscita un segnale analogico di tensione proporzionale allo spostamento istantaneo della superficie del *target*. È dotato di due uscite: una dotata di un filtro passa-basso a 22 MHz ed un'altra filtrata a 2 MHz; quest'ultima permette di avere un miglior SNR e viene utilizzata nel caso di vibrazioni a più bassa frequenza. Il funzionamento di questo decodificatore si basa sulla tecnica "Demodulazione di Fase Analogica" vista nel paragrafo 2.2.3. L'informazione relativa allo spostamento della superficie viene ricavata a partire dalla fase del segnale Doppler, pertanto è possibile rilevare al massimo spostamenti corrispondenti ad una variazione di fase di  $\pm 90^\circ$ , ovvero nell'intervallo  $\pm 79$  nm. Il fattore di conversione del decodificatore di spostamento è di 50 nm/V. Le specifiche dettagliate del OFV 2700-2 e del OVD-30 sono indicate rispettivamente nella tabella 3.2 e 3.3.

- **Microscopio Leica DMLM/P** (Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Germany): si tratta di uno strumento modulare molto versatile adatto per l'analisi dei materiali sia nel settore industriale che nella ricerca. Il microscopio utilizzato nella stazione di misura è dotato

dei seguenti obiettivi: 1.6x, 5x, 20x, 50x. È fornito di un connettore C-mount compatibile con l'adattatore OFV-074 Polytec: in questo modo è possibile monitorare in remoto il processo di scansione mediante la videocamera contenuta nell'adattatore.

- **Controllo di messa a fuoco motorizzato (asse z) H122 Prior** (*Motorized Focus Drive*) (Prior Scientific Inc., Rockland, USA). Consente di pilotare in remoto la messa a fuoco del tavolo del microscopio con *step size* di 2 nm.
- **Controllo motorizzato del tavolo del microscopio (piano x-y) H101 Prior** (*Motorized Stepper Stage*). Permette di ispezionare un'area maggiore di quella visibile con il microscopio ottico. Infatti nel caso di trasduttori MEMS per indagare in maniera dettagliata il comportamento vibrazionale spesso risulta necessario utilizzare un obiettivo con fattore di ingrandimento 20x oppure 50x: tale obiettivo consente di visualizzare solo un'area molto ridotta del dispositivo. Il tavolo motorizzato consente di coprire un'area di 108 mm x 71 mm con una risoluzione di 40 nm ed una ripetibilità di  $\pm 0.3 \mu\text{m}$ .
- **Generatore di polarizzazione:** fornisce una tensione continua al dispositivo MEMS nell'intervallo  $0 \text{ V} \div 600 \text{ V}$  con una corrente massima di 1.67 mA ed un *ripple* residuo minore di 1.5 mV a fondo scala.
- **Generatore di funzioni Hp 8116A** (Agilent Technologies, Loveland, USA): genera segnali aventi forma d'onda di diverso tipo (sinusoidale, triangolare, quadrata, impulso, ecc.), ampiezza variabile nell'intervallo  $10 \text{ mV}_{pp} \div 16 \text{ V}_{pp}$  e frequenza impostabile nell'intervallo  $1 \text{ mHz} \div 50 \text{ MHz}$ . Il generatore di funzioni viene utilizzato per eccitare il MEMS alla frequenza desiderata. I valori possono essere impostati dal pannello di controllo dello strumento oppure in remoto tramite il computer connesso al Hp 8116A attraverso il bus GPIB.

- **Oscilloscopio digitale Tektronix TDS 5034B** (Tektronix, Beaverton, USA): utilizzato per visualizzare il segnale di uscita dell'interferometro ed il segnale d'eccitazione fornito dal generatore di funzioni. L'oscilloscopio è dotato di 4 canali ognuno con risoluzione di 8 bit (risoluzione maggiore di 11bit se si utilizzano le medie), la frequenza di campionamento massima del segnale acquisito è di 5 GS/s, la larghezza di banda analogica è 350 MHz. Lo strumento è connesso in remoto al computer mediante il bus GPIB.

### 3.1.1 Specifiche del vibrometro Polytec MSV 300

Di seguito sono riportate le specifiche dettagliate riassuntive del vibrometro.

#### Interferometro (OFV-511)

|                                     |                       |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Tipo di laser                       | Elio-Neon (HeNe)      |
| Lunghezza d'onda del laser          | 633 nm                |
| Lunghezza della cavità              | 205 mm                |
| Potenza di uscita del laser/classe  | 2.3 mW/ IIIa          |
| Potenza d'uscita del sistema/classe | < 1 mW/ II            |
| Alimentazione richiesta             | $\pm 5$ V, $\pm 15$ V |

Tabella 3.1: Caratteristiche generali dell'interferometro (OFV-511).

### Controllore del vibrometro (OFV 2700-2)

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Alimentazione richiesta    | 100 / 120 / 220 / 240 V (AC), 50/60 Hz            |
| Consumo di potenza massimo | 80 VA   |
| Livello di uscita RF       | Circa $0.5 V_{pp}$ con terminazione a $50 \Omega$ |

Tabella 3.2: Controllore del vibrometro (OFV 2700-2).

### Decodificatore di spostamento OVD-30

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Massimo spostamento misurabile | $\pm 75 \text{ nm}$   |
| Livello di uscita              | $50 \text{ nm/V}$ con terminazione a $50 \Omega$<br>$25 \text{ nm/V}$ con terminazione<br>ad alta impedenza |
| Frequenza di lavoro            | $50 \text{ KHz} \dots 20 \text{ MHz}$   |
| Frequenza di cutoff inferiore  | $25 \text{ KHz}$  |
| Frequenza di cutoff superiore  | $24 \text{ MHz}$  |
| Velocità massima               | $6 \text{ m/s}$   |
| Errore di linearità            | $< -1\%$ nel range $\pm 25 \text{ nm}$<br>$< -5\%$ nel range $\pm 50 \text{ nm}$                            |
| Distorsione armonica           | $< 2\%$ @ $100 \text{ nm}_{pp}/ 1 \text{ MHz}$  |
| Delay time                     | $< 100 \text{ ns}$  |

La risoluzione è limitata dal rumore e dipende dalla riflessività della superficie. Con una riflessività pari al 100%, vale  $10^{-13} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

NB: Utilizzare sempre una terminazione a  $50 \Omega$  per frequenze  $> 2 \text{ MHz}$ .

Tabella 3.3: Decodificatore di spostamento (OVD-30).

**Ottica (OFV-74, OFV-073)**

Connessione al microscopio C-mount  
 Scanner: *dual piezo scan stage*  
 Video camera:  
 Sistema video CCIR/PAL  
 Sensore array CCD monocromatico  
 (equivalente ottico 2/3'')

| Area visibile al microscopio | Area visibile dalla videocamera (768 × 576 pixel) | Diametro spot laser | Obiettivo |
|------------------------------|---|---------------------|-----------|
| 1760 × 1320 μm               | 2073.6 × 1555.2 μm                                | 10 μm               | 5×        |
| 880 × 660 μm                 | 1036.8 × 777.6 μm                                 | 5 μm                | 10×       |
| 440 × 330 μm                 | 518.4 × 388.8 μm                                  | 2.5 μm              | 20×       |
| 176 × 132 μm                 | 207.3 × 155.5 μm                                  | 1 μm                | 50×       |

| Fattore di conversione pixel → μm   | Obiettivo |
|---|-----------|
| $(2073.6)/(768) = (1555.2)/(576) \Rightarrow 1 \text{ pixel} = 2.7\mu\text{m}$  | 5×        |
| $(1036.8)/(768) = (777.6)/(576) \Rightarrow 1 \text{ pixel} = 1.35\mu\text{m}$  | 10×       |
| $(518.4)/(768) = (388.8)/(576) \Rightarrow 1 \text{ pixel} = 0.675\mu\text{m}$  | 20×       |
| $(207.36)/(768) = (155.52)/(576) \Rightarrow 1 \text{ pixel} = 0.27\mu\text{m}$ | 50×       |

Tabella 3.4: Adattatore per microscopio ed unità di scansione (OFV-74, OFV-073).

### 3.2 Interfacce di controllo

Questo paragrafo offre una panoramica sulle interfacce (fig. 3.3) scelte per il controllo in remoto dei dispositivi che compongono la stazione di misura. La figura 3.2 mostra i collegamenti fra i vari componenti e le interfacce che permettono al computer di gestire e monitorare in tempo reale il processo di scansione.

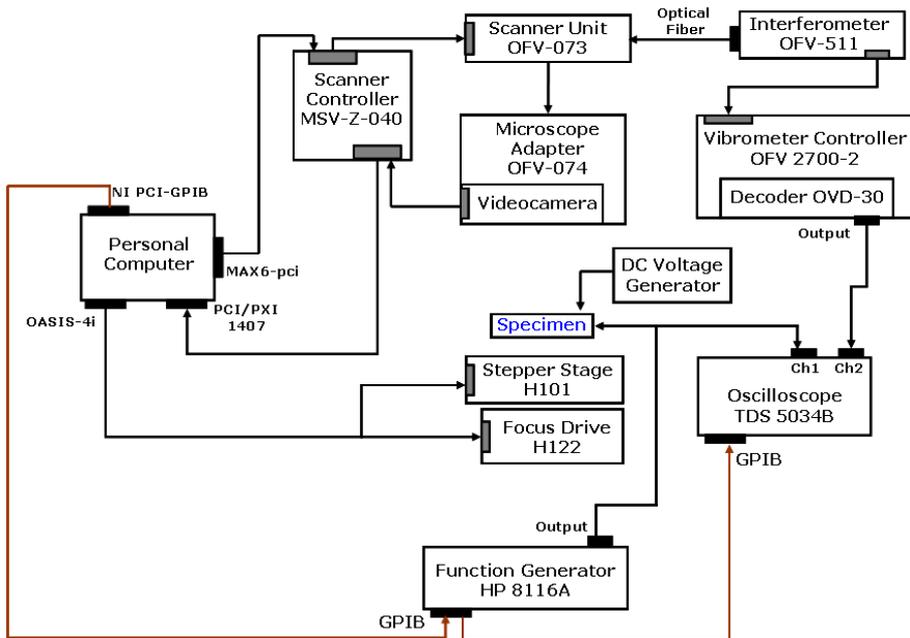


Figura 3.2: Stazione di misura: collegamenti tra i componenti e le interfacce in un tipico setup di misura su dispositivi cMUT.

L'oscilloscopio digitale TDS 5034B ed il generatore di funzioni Hp 8116A sono controllati tramite il bus GPIB. L'interfaccia che provvede al collegamento tra il computer e tali strumenti è la scheda **NI PCI-GPIB** prodotta

dalla National Instruments (National Instruments, Austin, USA). Si tratta di uno dei migliori *controller* presenti attualmente sul mercato: è compatibile sia con lo standard IEEE 488 (velocità di trasferimento dati: 1.5 MB/s) che con il protocollo HS488 (velocità di trasferimento dati: 7.7 MB/s) brevettato dalla National Instruments. Nella stazione di misura essa assume il ruolo di *system controller* ovvero svolge un ruolo analogo a quello di un centro di commutazione di una centrale telefonica: si occupa del monitoraggio completo della “rete” GPIB. Essa decide, in ogni istante, quale dispositivo *talker* possa trasmettere dati e quali dispositivi *listener* possano riceverne, prima di iniziare il trasferimento dei dati stessi sulle linee del bus.

L'interfaccia **PCI/PXI 1407** (National Instruments) viene utilizzata per convertire in digitale i segnali video analogici provenienti dalla videocamera e permette quindi di visualizzare sul computer il processo di scansione in tempo reale. È una scheda PCI ad alte prestazioni che svolge la funzione di ADC flash ad 8 bit; è particolarmente indicata per l'acquisizione di immagini monocromatiche tramite la libreria IMAQ-Vision di LabVIEW. Infatti utilizzando i *driver* NI-IMAQ di National Instruments è possibile controllarla in maniera semplice e veloce direttamente nell'ambiente di sviluppo LabVIEW senza necessità di programmare il dispositivo a livello di registri. La scheda supporta gli standard video RS-170 e CCIR ed è in grado di acquisire fotogrammi in tempo reale e trasferirli direttamente alla memoria di sistema.

L'interfaccia **MAX6-pci** (SORCUS Computer GmbH, Heidelberg, Germany) permette di pilotare l'unità di scansione (OFV-073) e quindi di posizionare il fascio laser in un punto qualsiasi nell'area visibile dalla videocamera. Si tratta di una scheda PCI del tipo *carrier card* ovvero può svolgere funzioni diverse a seconda dei moduli montati su di essa, pertanto può operare sia in modo ‘passivo’, sia come scheda ‘intelligente’ nel caso in cui venga equipaggiata con un modulo fornito di CPU. Per svolgere la funzione di DAC a 16 bit, è stata equipaggiata con due moduli: X-DA 16-4/U,

X-DIO 40/i.

La scheda **OASIS-4i** (Objective Imaging, Kansasville, USA) è un *controller* che consente di pilotare fino ad un massimo di quattro micro-motori passo-passo senza bisogno di una alimentazione esterna al computer. Viene solitamente utilizzata per l'automazione di misure al microscopio; nella stazione di misura permette di pilotare simultaneamente ed indipendentemente i motori (H101 Prior) che consentono il posizionamento del tavolo del microscopio (piano x-y) ed il dispositivo motorizzato di messa a fuoco per l'asse z (H122 Prior). L'algoritmo per la gestione automatica di quest'ultimo è stato implementato nell'ambiente LabVIEW.

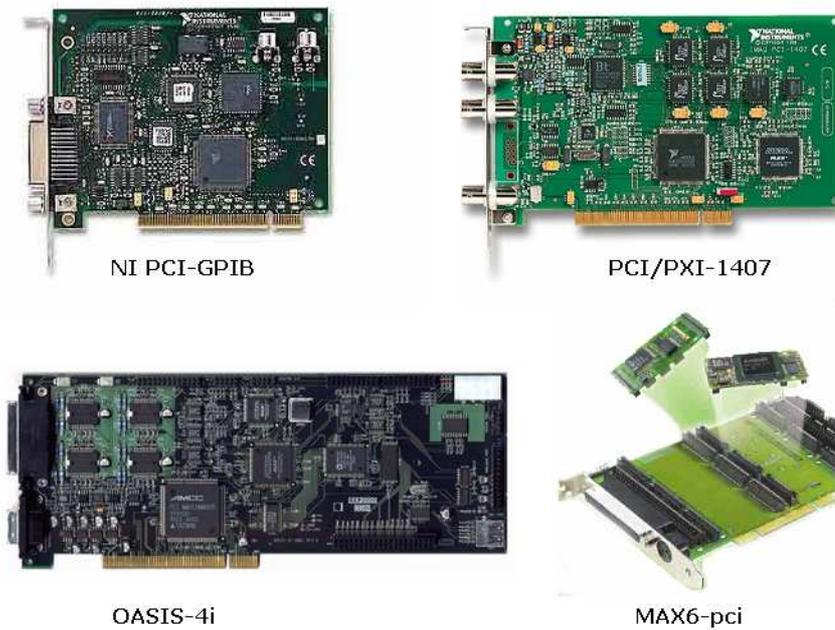


Figura 3.3: Interfacce di controllo.

### 3.3 Standard IEEE 488

Lo standard IEEE 488, anche noto come GPIB (*General Purpose Interface Bus*) oppure HP-IB (*Hewlett-Packard Instrument Bus*) fu ideato alla fine degli anni '60 dall'azienda Hewlett-Packard per connettere tra loro diversi tipi di strumenti di misura con un *controller*, ad esempio un personal computer, ed effettuare lo scambio di dati in maniera semplice e veloce. Questo *bus* era relativamente semplice da realizzare con le tecnologie a disposizione infatti si trattava di un semplice *bus* di tipo parallelo con alcune linee di controllo, le funzioni di interfaccia potevano essere gestite facilmente con una semplice logica TTL. Per questi motivi anche altri costruttori di strumentazioni elettroniche cominciarono ad usare lo standard HP-IB e successivamente gli diedero il nome di GPIB. Nel 1975 tale *bus* fu standardizzato dalla IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e ridefinito con il nome di IEEE 488.1. Furono definite le caratteristiche fisiche ed elettriche e le funzioni di interfaccia che i costruttori dovevano implementare sugli strumenti affinché questi potessero utilizzare il *bus* nella trasmissione dei dati. Per quanto riguarda le funzioni svolte dai dispositivi i costruttori erano liberi di implementarle come desideravano scegliendo come ritenevano opportuno il formato dei comandi e dei dati. Nel 1987 la revisione dello standard IEEE 488.1 ad opera di ANSI (*American National Standards Institute's*) ed IEEE, portò alla nuova versione IEEE 488.2 nella quale sono definiti chiaramente i protocolli per la comunicazione tra dispositivi ed il formato della trasmissione dei dati sul bus.

Lo standard IEEE 488 viene attualmente impiegato dalla maggior parte di costruttori di strumenti di misura per le sue caratteristiche di affidabilità, velocità di trasferimento dati (1MB/s) e semplicità di utilizzo. Il *bus* è realizzato raggruppando tra loro 24 linee in un unico cavo, di cui otto permettono il trasferimento in parallelo di un byte di dati per volta secondo una trasmissione asincrona. È possibile connettere fra loro fino ad un massimo di quindici dispositivi di cui almeno due terzi autoalimentati, cioè

tali da non prelevare l'alimentazione dal *bus*. La distanza massima fra un dispositivo ed un altro deve essere di quattro metri e la lunghezza complessiva non deve superare venti metri. È possibile collegare i dispositivi secondo due diverse configurazioni di connessione: "lineare" ed "a stella". La prima consiste nel connettere i dispositivi in cascata tra loro e l'ultimo della catena viene collegato con il computer. Nella seconda tutti gli strumenti, compreso il computer, vengono connessi su uno stesso dispositivo.

Per consentire l'indirizzamento corretto dei dati, ogni strumento o scheda d'interfaccia connessa sul *bus* deve possedere un indirizzo univoco in quanto alcuni messaggi sono destinati a tutti i dispositivi (*Universal Multiline Commands*), altri sono diretti ad uno solo (*Addressed Commands*). Inoltre per un corretto coordinamento del flusso di dati ogni dispositivo deve svolgere in un determinato istante uno solo dei seguenti ruoli: *Listener* (dispositivo abilitato a ricevere dati quando indirizzato), *Talker* (dispositivo abilitato a trasmettere dati quando indirizzato), *Controller* (dispositivo in grado di stabilire quale è il *Talker* e quali sono i *Listener* in un trasferimento di dati). In ogni istante un solo dispositivo può essere *Talker* ed un massimo di quattordici possono essere contemporaneamente *Listener*. Il *Controller* che di solito è costituito dalla scheda di interfaccia montata sul computer, si occupa di gestire il flusso dei dati decidendo in ogni istante, quale dispositivo *Talker* possa trasmettere dati e quali dispositivi *Listener* possano riceverne prima di cominciare il trasferimento dei dati stessi sul *bus*.

Per quanto riguarda le caratteristiche elettriche, i livelli di tensione utilizzati per lo scambio di dati sul *bus* GPIB sono compatibili TTL. Si utilizza una logica negativa per cui al livello di tensione inferiore a 0.8 V si assegna il valore logico 1 (*True*) mentre al livello di tensione superiore a 2.4 V si attribuisce il valore logico 0 (*False*).

### 3.4 Setup di misura

Sebbene la stazione di misura consenta la caratterizzazione interferometrica di generici trasduttori MEMS con vibrazioni *out-of-plane*, tuttavia è stata concepita essenzialmente per la caratterizzazione interferometrica di trasduttori ultrasonici ed in particolare per i dispositivi cMUT. Pertanto nella definizione delle specifiche in fase di progetto, particolare attenzione è stata riservata ai requisiti richiesti per estrarre dalle misure di deformazione le informazioni di interesse per lo studio di questo genere di trasduttori.

Il tipico setup di misura (fig. 3.2) su trasduttori cMUT prevede l'utilizzo di un generatore di tensione per polarizzare il dispositivo con una tensione continua ed un generatore di funzioni per eccitarlo con un segnale: solitamente si utilizza una sinusoide continua o una successione di burst sinusoidali. Il segnale di eccitazione viene acquisito sul canale 1 dell'oscilloscopio (Ch1). L'uscita del vibrometro produce un segnale analogico proporzionale allo spostamento istantaneo della superficie del trasduttore nel punto in cui è posizionato lo *spot* del laser; tale segnale è connesso con il canale 2 dell'oscilloscopio (Ch2). Il fattore di conversione della tensione all'uscita del vibrometro è 50 nm/V nel caso in cui si utilizzi una terminazione a 50  $\Omega$  come indicato nelle specifiche del vibrometro (tab. 3.3). L'oscilloscopio effettuerà misure di ampiezza sul canale 1 e misurerà la differenza di fase tra il canale 2 ed il canale 1. Un'altra possibilità di misura consiste nell'utilizzare come eccitazione un impulso anziché un'eccitazione continua: in questo caso l'oscilloscopio memorizzerà dal canale 1 l'intera forma d'onda nel tempo.



## Capitolo 4

# Il software di controllo

La realizzazione di un software per il controllo automatico di una stazione di misura come quella oggetto di questa Tesi, è un lavoro molto oneroso. Spesso le difficoltà che si incontrano nella progettazione dipendono dalle scelte fatte nella fase di studio preliminare nella quale si affrontano le strategie realizzative. La scelta oculata dell'ambiente di sviluppo, delle librerie, e dei programmi per la post-elaborazione delle misure, è determinante ai fini del risultato che si intende ottenere.

In questo capitolo si descrivono i software realizzati illustrandone i pannelli di controllo e le funzionalità principali. Vengono illustrati brevemente l'ambiente di sviluppo utilizzato, le librerie, l'architettura di comunicazione tra i vari componenti software, alcune delle scelte effettuate per la soluzione dei problemi affrontati in fase di progetto.

### 4.1 Pacchetti software realizzati per la stazione di misura

L'esigenza di analizzare con elevata risoluzione spaziale (1-10  $\mu\text{m}$ ) superfici dell'ordine di alcuni centimetri ed eseguire spettri di spostamento con

elevata risoluzione in frequenza (1-100 kHz) su un intervallo molto esteso (1-20 MHz), evidenzia la necessità di sviluppare un sistema quanto più possibile automatizzato per l'analisi del comportamento vibrazionale di dispositivi MEMS. Come anticipato nel paragrafo 3.4 la stazione di misura è stata concepita essenzialmente per effettuare misure interferometriche su dispositivi cMUT pertanto il software di controllo è stato progettato cercando di soddisfare in primo luogo le specifiche richieste per la caratterizzazione di tali trasduttori. Lo sviluppo del software nel corso di questo lavoro di Tesi ha subito un lavoro continuo di aggiornamento per migliorare da un lato le prestazioni in termini di velocità di esecuzione, dall'altro per incrementarne le funzionalità al fine di estrarre dalle misure di spostamento il maggior numero di informazioni utili per comprendere il funzionamento dei dispositivi e migliorarne le prestazioni e l'affidabilità.

I tre software realizzati per la stazione di misura consentono la gestione completa del processo di scansione: il monitoraggio in tempo reale, l'acquisizione su file delle grandezze misurate, nonché l'elaborazione dei dati e la visualizzazione dei risultati.

#### 4.1.1 MCP software

Il programma denominato MCP (*Mems Characterization Program*) consente di effettuare un'analisi dettagliata della deformazione del trasduttore all'interno dell'area visibile dalla videocamera. Tramite una semplice operazione di trascinamento del mouse sullo schermo del computer è possibile definire una griglia di scansione (ROI ovvero *Region Of Interest*) sovrapposta all'area che si intende ispezionare (fig. 4.1). Tale area è visualizzata grazie alla videocamera montata sull'adattatore del microscopio (OFV-074).

La scansione è effettuata posizionando lo *spot* del laser nei punti di intersezione della griglia. Nel caso in cui si utilizzi una eccitazione sinusoidale continua, per ciascun punto verrà acquisita tramite oscilloscopio l'ampiezza di spostamento e la differenza di fase tra il segnale con cui il trasduttore

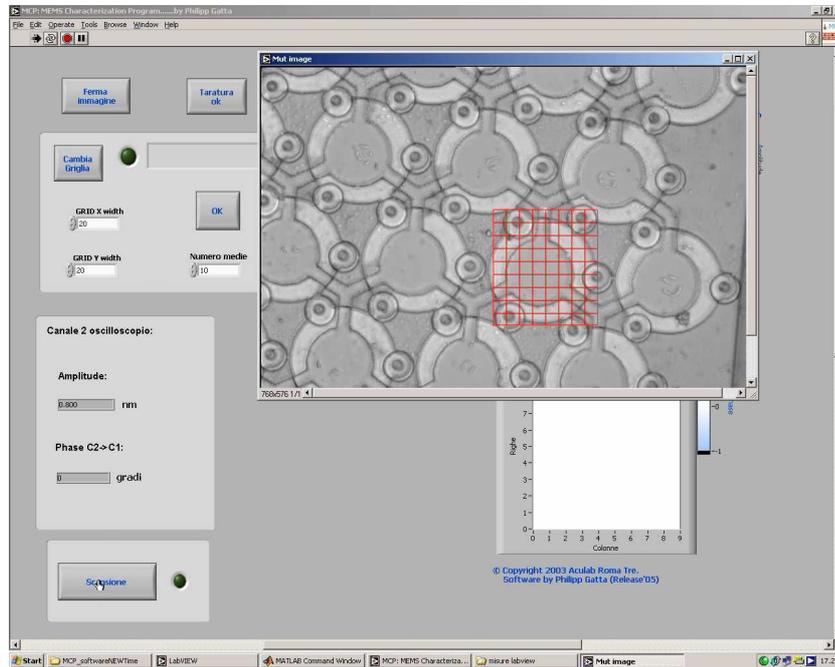


Figura 4.1: Pannello di controllo del software MCP.

viene eccitato ed il segnale di spostamento in uscita dal vibrometro. Nell'ipotesi in cui l'eccitazione sia la stessa per tutti i punti di misura ed il setup sia invariante nel tempo, la misura eseguita in maniera sequenziale è equivalente ad una in cui tutte le misure siano acquisite in parallelo. Facendo inoltre l'ipotesi che la risposta del trasduttore sia lineare con l'eccitazione applicata è possibile ricostruire il movimento della superficie del trasduttore a partire dai dati acquisiti e salvarla come file nel formato AVI (*Audio Video Interleave*). Il software MCP è in grado di effettuare questa ricostruzione al termine della scansione tramite Matlab (The MathWorks, Natick, USA). È possibile inoltre mappare l'ampiezza della deformazione elaborando con il programma Surfer (Golden Software, Golden, USA) i dati

acquisiti (fig. 4.2).

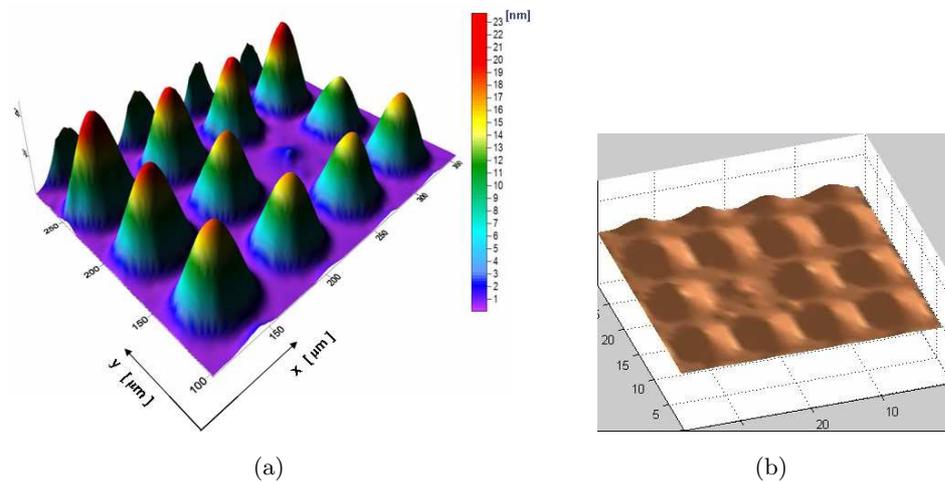


Figura 4.2: Una mappa di scansione (a). Ricostruzione del movimento della superficie (b).

Nel caso in cui si utilizzi come segnale di eccitazione un impulso, per ciascun punto di intersezione della griglia verrà acquisita, mediante oscilloscopio, l'intera forma d'onda nel tempo. Al termine della misura è possibile ricostruire con Matlab il movimento della superficie del trasduttore nel tempo.

#### 4.1.2 TSA software

A differenza del programma MCP, che permette uno studio dettagliato del comportamento vibrazionale di qualsiasi dispositivo MEMS con vibrazioni *out-of-plane*, il software TSA (*Transducer Surface Analysis*) nasce dalla necessità di automatizzare i processi di analisi e verifica dei trasduttori cMUT al fine di valutare l'affidabilità, la qualità del processo di fabbricazione e soprattutto il grado di uniformità di quest'ultimo sia sul singolo trasduttore

#### 4. Il software di controllo

che sull'intero wafer. Questo genere di analisi risulta particolarmente utile soprattutto per valutare la resa del processo quando si sceglie una nuova *foundry* o quando si effettuano delle modifiche rilevanti sul progetto o sui materiali impiegati.

Il software TSA (fig. 4.3) consente di analizzare in maniera automatica l'intera superficie del cMUT effettuando una misura di spostamento al centro di ciascuna membrana del trasduttore. La scansione inizia dal primo elemento del trasduttore, una volta terminata passa al successivo fino a coprire tutta l'area del trasduttore.

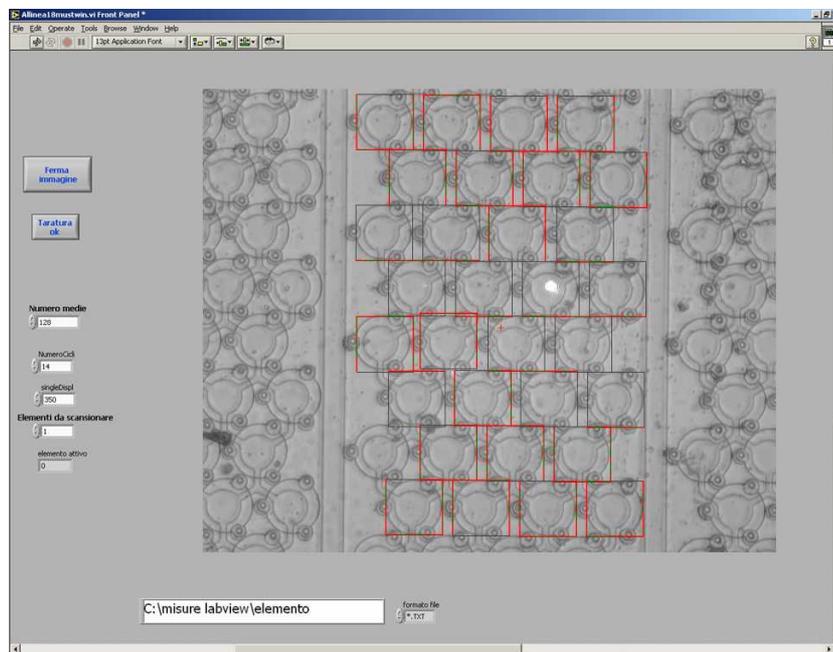


Figura 4.3: Pannello di controllo del software TSA: una scansione in corso. La macchia bianca posizionata al centro di una cella generica, rappresenta lo *spot* del laser di misura.

Ciascun elemento viene analizzato facendo scorrere il piano del microscopio secondo un certo numero di passi che permettono di coprire tutta la superficie dell'elemento. Ad ogni passo quest'ultimo viene ricentrato lungo i due assi x ed y (fig. 4.4(a)) e la superficie viene messa a fuoco: tali operazioni sono assolutamente necessarie per l'esecuzione automatica della scansione e per garantire l'esatta copertura di tutta la superficie mediante un determinato numero di passi di scansione.

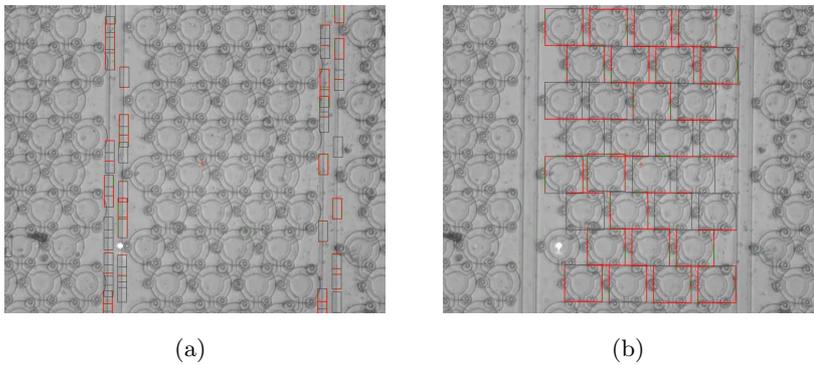
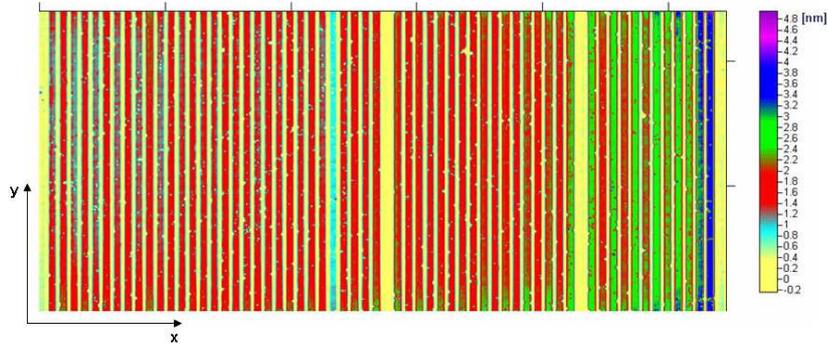
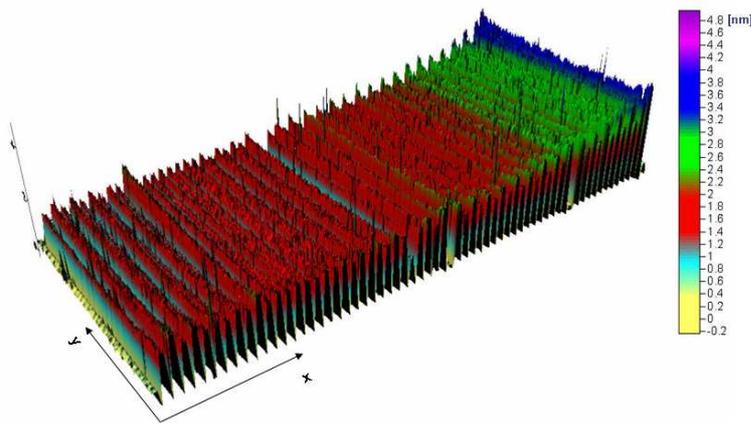


Figura 4.4: Ricentramento lungo x ed y (a). Riconoscimento membrane (b).

Dopo l'operazione di ricentatura e messa a fuoco il software riconosce le membrane in base ad un *template* di riferimento (fig. 4.4(b)) ed esegue al centro di ognuna una misura di spostamento. Il tempo complessivo per una scansione completa di un dispositivo cMUT richiede circa ventuno ore, ma l'analisi avviene in maniera completamente automatica senza bisogno di alcun intervento esterno dell'operatore. Al termine della scansione il software TSA visualizza una mappa rappresentativa della deformazione di tutte le membrane del trasduttore cMUT (fig. 4.5). La percentuale di riconoscimento delle membrane sull'intera superficie è sempre superiore al 98%. I dati acquisiti su file possono essere rappresentati tramite un istogramma di spostamento (fig. 4.6 (a)): il grafico riporta in ascissa l'ampiezza di sposta-



(a)



(b)

Figura 4.5: Mappa di scansione completa su un trasduttore cMUT. 2D Plot (a). 3D Plot (b).

mento ed in ordinata il corrispondente numero di membrane aventi quella ampiezza di deformazione. L'istogramma di spostamento, come verrà spiegato nel cap. 6 permette di valutare l'uniformità di funzionamento della superficie del trasduttore e del wafer oltre che l'eventuale presenza di aree del dispositivo aventi prestazioni diverse. La post-elaborazione dei dati acquisiti prevede anche la possibilità di rappresentare su un grafico l'ampiezza media di spostamento per ciascun elemento del trasduttore (fig. 4.6 (b)).

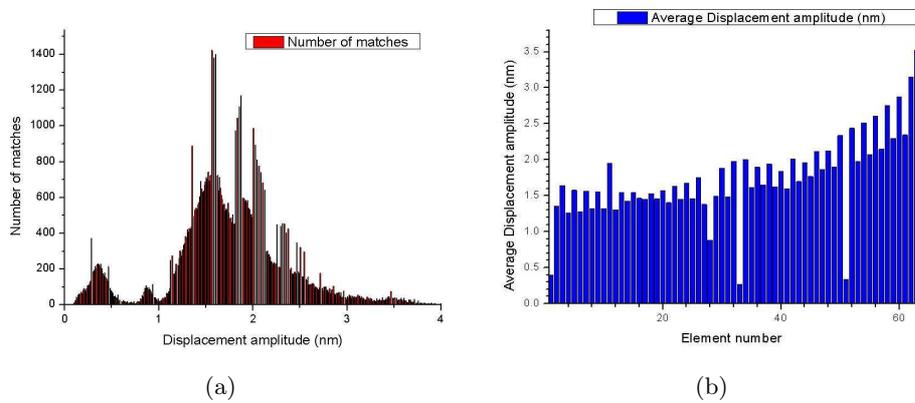
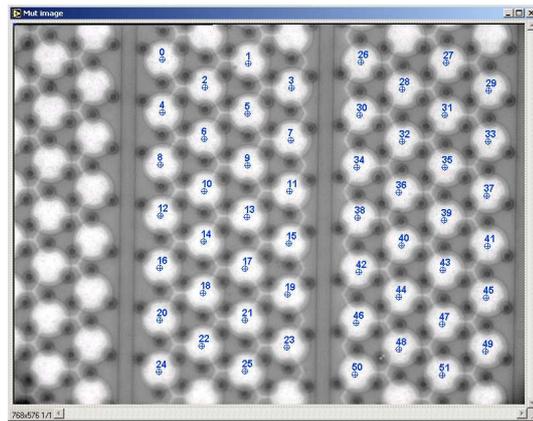


Figura 4.6: Iistogramma di spostamento (a). Spostamento medio di ciascun elemento (b).

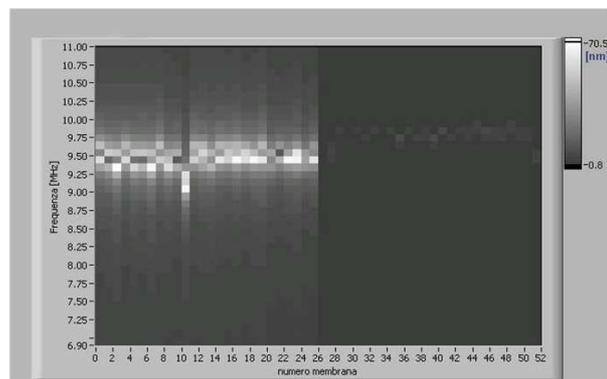
### 4.1.3 DSA software

L'ultimo tra i pacchetti software realizzati per la stazione di misura è stato chiamato DSA (*Displacement Spectrum Analysis*) in quanto consente di selezionare all'interno dell'area visibile dalla videocamera un certo numero di membrane (fig. 4.7 (a)) ed effettuarne lo spettro di spostamento su un'intervallo di frequenza desiderato (fig. 4.7 (b)). Il programma permette di estrarre informazioni utili sia sul progetto che sulla qualità del processo

tecnologico a partire dagli spettri di spostamento. Le sue potenzialità sono illustrate nel cap. 6.



(a)



(b)

Figura 4.7: Software DSA. Selezione membrane (a). Spettri di spostamento per le membrane selezionate (b).

## 4.2 Progetto del software

Il primo passo nello sviluppo del software è stato quello di definirne le specifiche. Il passo successivo riguarda la definizione delle strategie realizzative ovvero: scelta dei componenti della stazione di misura, delle interfacce per il controllo in remoto dei dispositivi, dell'ambiente di sviluppo nonché dei programmi per la post-elaborazione delle misure effettuate. La scelta dei componenti e delle interfacce è descritta nel capitolo 3. Essa deve essere il giusto compromesso tra risorse necessarie, costi e flessibilità della stazione di misura in vista di applicazioni future. Le scelte operate relativamente allo sviluppo del software nonché la soluzione dei problemi affrontati in fase di progetto sono descritte nel presente paragrafo.

### 4.2.1 L'ambiente di sviluppo: LabVIEW 7.1

I software realizzati per la stazione di misura sono stati implementati nell'ambiente di sviluppo LabVIEW 7.1 (National Instruments, Austin, USA). Attualmente esso rappresenta il miglior ambiente di sviluppo per applicazioni orientate al controllo in remoto di dispositivi elettronici nonché alla acquisizione ed elaborazione dei dati in tempo reale. Caratteristiche delle applicazioni create in LabVIEW sono: velocità di esecuzione, potenza di calcolo real-time, affidabilità ed estrema versatilità. Per apprezzarne le potenzialità basti pensare che esso è utilizzato sullo Space Shuttle, nei sottomarini della marina militare americana, in alcune centrali nucleari, nei test sui Boeing, nei *crash test* per le automobili, nella gestione degli acceleratori di particelle e in molte altre applicazioni sia nella ricerca scientifica sia per il controllo di processi industriali.

La prima versione di LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) risale al 1987. Tale ambiente di sviluppo era particolarmente esigente dal punto di vista delle risorse grafiche, per questo motivo le prime versioni di LabVIEW furono realizzate solamente per il

sistema Macintosh (Apple Computer, Cupertino, USA). Con l'avvento di Windows 3.1 e successivamente di Windows 95 è stato possibile fornire LabVIEW anche agli utenti del mondo Microsoft (Microsoft Corporation, Redmond, USA). Attualmente è disponibile per le seguenti piattaforme: Windows, Solaris, Linux, Mac OS. Il linguaggio di programmazione nell'ambiente LabVIEW è detto *G language* (*Graphical Language*). Si tratta di un linguaggio ad alto livello nel quale i programmi vengono realizzati nella forma di diagrammi a blocchi mediante un'interfaccia grafica di facile utilizzo. La sequenza di esecuzione delle istruzioni e quindi il flusso dei dati viene definita graficamente attraverso fili monodirezionali che collegano i diversi blocchi funzionali. Questo oltre a rendere molto semplice la comprensione del programma e facilitare la ricerca degli errori (*debug*), permette il flusso dei dati in parallelo attraverso blocchi e fili non consecutivi realizzando in questo modo il *multithreading* senza bisogno di una gestione esplicita da parte del programmatore. La struttura modulare di LabVIEW consente la realizzazione di programmi molto complessi tramite la suddivisione in sottoprogrammi più semplici che a loro volta possono essere raccolti in librerie facilmente riutilizzabili. Come già esposto precedentemente, una delle peculiarità di questo ambiente di sviluppo è la velocità di esecuzione del codice e l'estrema affidabilità: questo è reso possibile dal fatto che il linguaggio G è di tipo compilato. Prevede una fase di compilazione in cui si creano i vari oggetti ed una successiva fase di *link* che collega tra loro i vari oggetti creando in questo modo il programma eseguibile. Durante la fase di compilazione Labview traduce in C le istruzioni che il programmatore definisce nella stesura del codice. Tali operazioni vengono gestite dall'ambiente di sviluppo in maniera completamente autonoma pertanto il programmatore ha la sensazione di operare con un linguaggio interpretato come il BASIC che in fase di esecuzione traduce ogni singola istruzione in linguaggio macchina, ma ha a disposizione i grandi vantaggi in termini di velocità che solo un linguaggio compilato può fornire.

### 4.2.2 Architettura di comunicazione tra componenti software

Una delle caratteristiche principali di LabVIEW è la possibilità di comunicazione sia con strumenti di varia natura attraverso un gran numero di interfacce diverse (GPIB, seriale, parallela, VXI, ecc.), sia con altre metodologie di comunicazione senza fili (IrDA, bluetooth, ecc.), sia attraverso connessioni di rete utilizzando protocolli di vario genere (TCP/IP, UDP, SMTP, ecc.), sia attraverso l'architettura COM-ActiveX. Quest'ultima riveste un ruolo primario nello sviluppo del software per la stazione di misura realizzata in quanto permette a componenti software esterni di vario genere (librerie, applicazioni, software di sistema, ed altri) di interagire con il programma principale scritto in LabVIEW. Tale programma può quindi essere utilizzato sia come *client* che come *server* per accedere a software esterni ed usufruire dei servizi offerti da quest'ultimi. In questa maniera è possibile controllare attraverso l'ambiente LabVIEW tutti quei dispositivi della stazione di misura dotati di librerie accessibili dall'esterno. È possibile accedere alle librerie della Polytec per pilotare l'unità di scansione (OFV-073), alle librerie della Objective Imaging per controllare attraverso la scheda OASIS-4i il sistema di messa a fuoco (H122 Prior) ed il tavolo motorizzato del microscopio (H101 Prior). La tecnologia COM-ActiveX permette inoltre l'accesso a programmi esterni (Matlab, Surfer) per l'elaborazione automatica dei dati acquisiti su file.

L'architettura COM (*Component Object Model*), su cui si basano le tecnologie OLE (*Object Linking & Embedding*) ed ActiveX (*Active eXtension*), è abbastanza complessa per cui l'analisi approfondita del suo funzionamento non verrà approfondita in questa sede. Senza entrare troppo nei dettagli tecnici possiamo dire che l'architettura COM è uno standard binario indipendente da qualsiasi linguaggio di programmazione o compilatore, il cui scopo è quello di permettere il riuso di componenti software diversi residenti o meno su uno stesso computer. La tecnologia COM non specifica

come debba essere strutturata un'applicazione, i cui dettagli implementativi sono lasciati al programmatore, ma specifica un modello ad oggetti e le condizioni che permettono a tali oggetti (detti anche *OLE Components*) di interagire con altri. COM quindi non è un linguaggio, ma uno standard che stabilisce le regole di interazione tra componenti software diversi, indipendentemente dal linguaggio di programmazione usato per la loro implementazione, purché il codice generato dal compilatore sia in grado di creare e gestire strutture di puntatori e chiamate di funzione tramite puntatori. L'architettura COM è definita come uno "standard binario" in quanto tale standard viene applicato ai moduli dei programmi dopo la traduzione in codice binario macchina, cioè dopo la fase di compilazione.

### 4.2.3 Problemi affrontati in fase di progetto

Il progetto del software di controllo per la stazione di misura risulta alquanto complesso. Nonostante LabVIEW fornisca molte funzionalità avanzate per l'elaborazione delle immagini, la gestione degli strumenti attraverso il bus GPIB e la possibilità di interagire con le librerie per il controllo delle interfacce, i problemi incontrati in fase di progetto sono stati molteplici. Alcuni di questi sono elencati di seguito insieme alle strategie adottate per la loro soluzione.

#### Posizionamento del laser sulla griglia di scansione

Uno degli aspetti più importanti da considerare per effettuare un posizionamento accurato del laser sulla griglia di scansione riguarda la determinazione esatta della sua posizione sullo schermo del computer in condizioni di riposo (ovvero in assenza di deflessione del fascio). È stato appurato che in tali condizioni, pur essendo il raggio laser ortogonale alla superficie di scansione, la sua posizione sullo schermo varia inevitabilmente di alcuni pixel per ciascuna sessione di misura a causa di vibrazioni esterne al sistema di acquisizione utilizzato. Ad esempio, utilizzando per il microscopio

un obiettivo  $5\times$ , un pixel sullo schermo equivale a circa  $2.7 \mu\text{m}$  pertanto una variazione di 3 pixel nella posizione dello *spot* del laser si traduce in un errore di circa  $8 \mu\text{m}$ : questo grado di incertezza nel posizionamento spaziale risulta inaccettabile. Per risolvere questo problema il software MCP prevede una funzione detta “taratura del laser” mediante la quale all’inizio di ogni sessione di misura viene memorizzata l’esatta posizione del laser.

Un altro aspetto importante da considerare nello sviluppo di un sistema di visione artificiale consiste nella calibrazione del dispositivo di acquisizione video: tale operazione è necessaria per compensare errori prospettici e/o distorsioni non lineari dell’immagine. I primi spesso si verificano quando l’asse della videocamera non è perpendicolare alla superficie che si intende acquisire; i secondi sono aberrazioni geometriche dovute alle imperfezioni delle lenti e/o al loro spessore. Tipicamente le lenti dei sistemi ottici introducono distorsioni radiali le quali fanno sì che i punti lontani dal centro ottico della lente appaiano nell’immagine proiettata ancora più lontani dal centro di quanto siano effettivamente. Nell’immagine (a) della figura 4.8 è rappresentata la visualizzazione di una griglia di punti attraverso un sistema di acquisizione che non introduce distorsioni. L’immagine (b) rappresenta la stessa griglia nel caso in cui ci siano errori prospettici. La figura (c) mostra l’immagine visualizzata dalla videocamera in presenza di aberrazioni geometriche.

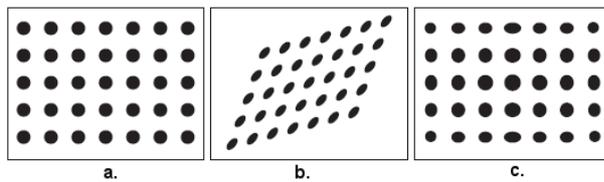


Figura 4.8: Errori prospettici e distorsioni geometriche.

Il sistema ottico e la videocamera utilizzati in questo lavoro di Tesi ri-

sultano opportunamente calibrati dalle rispettive case produttrici (Leica e Polytec), pertanto l'immagine video acquisita in tempo reale non mostra alcun errore prospettico e non necessita di un'ulteriore calibrazione di tipo software. Sono presenti tuttavia aberrazioni geometriche non trascurabili che si verificano quando il laser viene deflesso dall'unità OFV-073 per effettuare la scansione della superficie che si intende misurare. In particolare si è notato che tali distorsioni sono di tipo non lineare ovvero producono un errore nel posizionamento del laser che non varia linearmente con l'angolo di deflessione del laser rispetto alla sua posizione di riposo verticale. Oltre a questo va aggiunto il fatto che l'entità della distorsione è diversa lungo i due assi (x ed y) nel piano di scansione. Il fenomeno è imputabile a diverse cause: imperfezioni geometriche delle lenti del microscopio, imperfezioni superficiali degli specchi che deflettono il fascio laser, spessore non trascurabile delle lenti. Questo comporta l'impossibilità di eseguire un posizionamento sufficientemente accurato dello *spot* del laser sulla griglia di scansione. La soluzione adottata per risolvere il problema è stata quella di ricavare due algoritmi uno per il posizionamento esatto lungo l'asse x del piano di scansione e l'altro per il posizionamento esatto lungo y. Tali algoritmi consentono di calcolare la posizione esatta del laser su ciascuno dei due assi sulla base di un certo numero di dati sperimentali ed utilizzando su questi un processo di interpolazione con un polinomio di settimo grado. L'utilizzo combinato di tali algoritmi per il posizionamento in un punto qualsiasi della superficie di scansione, produce un'accuratezza nel posizionamento dell'ordine del pixel: tale risultato è più che soddisfacente per i nostri scopi.

### **Strategie per la scansione automatica della superficie**

I principali problemi riscontrati nella realizzazione del programma TSA riguardano la messa a fuoco, il riconoscimento automatico delle membrane del cMUT e la necessità di trovare una soluzione per ispezionare tutta la

superficie in maniera completamente automatica.

L'utilizzo di un obiettivo 20x per la scansione del trasduttore è importante per avere una buona risoluzione spaziale ed effettuare le misure al centro di ciascuna membrana con la necessaria accuratezza. Tuttavia la scelta di un fattore di ingrandimento così elevato comporta da un lato la necessità di eseguire la scansione secondo un certo numero di passi sufficienti a coprire l'intera estensione del trasduttore, dall'altro richiede la messa a fuoco della superficie ad ogni passo di scansione. Esistono diverse schede che permettono di pilotare il controllo motorizzato (H122 Prior) al fine di eseguire un autofocus tramite un controllo hardware. Tali soluzioni sono alquanto costose. Nel progetto della stazione di misura è stato scelto di realizzare un autofocus di tipo "software" sviluppando un algoritmo in linguaggio G. Esso utilizza le librerie NI-IMAQ di LabVIEW: estrae i contorni dell'immagine utilizzando un filtro derivativo del primo ordine (filtro di Prewitt) ed assegna un valore numerico al contrasto. Pilotando il controllo motorizzato è possibile trovare per approssimazioni successive la posizione del piano del microscopio corrispondente al valore di contrasto più elevato. L'algoritmo sviluppato consente la messa a fuoco della superficie in un tempo inferiore a quattro secondi nel caso peggiore (tipicamente impiega due secondi). Tale implementazione software risulta molto efficace e robusta alle vibrazioni esterne oltre che economica.

Un altro problema che bisogna affrontare per eseguire la scansione dell'intera superficie mediante un determinato numero di passi è quello relativo ai fattori che possono determinare la copertura non completa dell'area di scansione. Tali fattori sono: vibrazioni esterne al setup di misura, l'accuratezza nel posizionamento del tavolo del microscopio, e infine la posizione del trasduttore cMUT rispetto a tale piano. Supponiamo di trovarci nel caso migliore ovvero quello in cui all'inizio della scansione la direzione dell'*elevation* del singolo elemento sia parallela all'asse y del piano del microscopio. Durante la scansione il movimento del tavolo del microscopio

e le inevitabili vibrazioni esterne possono spostare il trasduttore di alcuni micron. Oltre a questo bisogna aggiungere il fatto che il controllo motorizzato del tavolo (H101 Prior) sebbene possieda una risoluzione elevata, ha un'accuratezza nel posizionamento di solo otto micron. L'insieme di questi fattori può portare alla mancata ispezione di alcune righe di membrane del cMUT quando si esegue la scansione secondo un determinato numero di passi. Problemi analoghi possono verificarsi quando ci si sposta da un elemento a quello a fianco: in questo caso potrebbe succedere che l'ultimo elemento non venga ispezionato. La soluzione proposta a tali problemi consiste nel riposizionamento accurato del trasduttore, al centro dell'immagine visibile dalla videocamera, ad ogni passo di scansione. L'algoritmo realizzato riconosce i bordi dell'elemento confrontandoli con un *template* (immagine di riferimento) ed effettua in automatico il riposizionamento.

Nella realizzazione del software per la stazione di misura il *pattern matching* viene utilizzato anche per riconoscere le membrane del cMUT e memorizzare la loro posizione ai fini della scansione dell'intera superficie. Esistono fondamentalmente due tecniche utilizzate per implementare il *pattern matching* [2]: quella nota come *template matching* e quella chiamata *geometric model matching*. La prima è di gran lunga la più utilizzata in quanto permette il riconoscimento di un *template* all'interno di un'immagine anche nel caso in cui essa risulti ruotata, traslata o con diversa scala. Il metodo risulta affidabile anche in condizioni di cattiva illuminazione e di rumore sovrapposto all'immagine. L'algoritmo implementato per il *pattern matching* si basa sulla cross-correlazione. Per ridurre i tempi di calcolo è possibile adottare alcune strategie ad esempio: non considerare tutti i pixel del *template* ma solo alcuni di essi, garantire che l'immagine nella quale si cerca il *template* non sia ruotata più di cinque o dieci gradi. Un ulteriore incremento nella velocità di riconoscimento si ottiene utilizzando un computer con un processore che supporti la tecnologia MMX oppure un processore *dual-core*. Essi permettono di effettuare moltiplicazioni in

parallelo: poiché alla base della cross-correlazione ci sono operazioni di moltiplicazione, il tempo di calcolo risulta notevolmente ridotto. L'implementazione nell'ambiente LabVIEW dell'algoritmo di *template matching* risulta molto efficiente considerando che le condizioni di illuminazione sono ottime e che il trasduttore non è ruotato (l'elemento è parallelo all'asse y del piano del microscopio). I tempi necessari per il riconoscimento delle membrane per ogni passo di scansione sono dell'ordine del decimo di secondo e la percentuale di riconoscimento è sempre superiore al 98% sull'intero trasduttore (circa 50000-70000 membrane a seconda del tipo di cMUT).

## Capitolo 5

# Caratterizzazione ottica di trasduttori cMUT

Come nel caso di qualsiasi dispositivo MEMS, l'affidabilità e le prestazioni dei trasduttori cMUT dipendono fortemente dalla qualità del processo di fabbricazione e dei materiali impiegati. Questo capitolo offre una panoramica sul nitruro di silicio, materiale strutturale della cella capacitiva cMUT, sulle sue proprietà, sui problemi di affidabilità più ricorrenti riscontrati nelle normali condizioni operative dei trasduttori. Alcuni di questi dipendono dalla qualità del nitruro di silicio e dal processo di deposizione, altri sono legati alla fotolitografia ottica.

### 5.1 Il nitruro di silicio nei trasduttori cMUT

Gli array cMUT (di tipo *Standard* o *Reverse*) progettati presso il laboratorio ACULAB sono realizzati utilizzando nitruro di silicio sia come materiale strutturale sia come strato protettivo della cella capacitiva. Si tratta di un materiale largamente utilizzato per la fabbricazione di dispositivi MEMS a causa delle sue buone proprietà meccaniche (elevato modulo di Young,

stress tensile facilmente controllabile durante il processo di deposizione) e dielettriche (utilizzato come strato elettricamente isolante). Nella fabbricazione di *array* cMUT il nitruro di silicio viene depositato con la tecnica PECVD (deposizione chimica da fase vapore assistita da plasma) che permette di utilizzare temperature di processo basse e quindi di integrare l'elettronica CMOS standard sullo stesso chip del cMUT ed utilizzare strati di metallo per gli elettrodi. Il nitruro di silicio in quanto materiale strutturale della microcella capacitiva deve possedere le seguenti caratteristiche:

- basso stress tensile per evitare rotture ed un basso stress compressivo che potrebbe causare il rigonfiamento delle membrane.
- Elevata resistività, per assicurare un buon isolamento elettrico fra i due elettrodi e limitare l'accumulo di carica all'interno del nitruro di silicio quando si polarizza il trasduttore a tensioni prossime a quella di collasso.
- Bassa porosità ed elevata impermeabilità all'acqua, per utilizzare il trasduttore nelle misure in immersione senza alcuno strato protettivo.

Il miglioramento delle caratteristiche sopra elencate rappresenta un obiettivo strategico per incrementare le prestazioni e dell'affidabilità dei dispositivi cMUT.

Diversi lavori sono stati pubblicati [24, 25, 26, 27] riguardo alla possibilità di controllare le proprietà dei film di nitruro di silicio agendo sui parametri di deposizione quali: temperatura, pressione, regolazione del flusso dei gas, frequenza di eccitazione del plasma. In particolare, un notevole miglioramento nelle proprietà del nitruro, utilizzato come materiale strutturale dei cMUT, è stato ottenuto passando dalla tecnica RF-PECVD [28] che utilizza una sola frequenza di eccitazione del plasma, alla tecnica DF-PECVD [29] che impiega due generatori a frequenze diverse. La tecnica DF-PECVD permette un controllo molto più accurato dello stress interno

del nitruro di silicio, aumenta di circa cinque ordini di grandezza la resistività del nitruro rispetto alla tecnica RF-PECVD, migliora le caratteristiche in termini di bassa porosità ed impermeabilità all'acqua [30].

## 5.2 Problemi di affidabilità del nitruro di silicio

La stazione di misura realizzata in questo lavoro di Tesi ha permesso di individuare e studiare in maniera dettagliata i principali problemi, legati al processo tecnologico ed alla qualità del nitruro, che possono compromettere le prestazioni, l'affidabilità e la durata di vita (*service life*) di un trasduttore cMUT. Di seguito sono elencati i principali problemi, rilevabili al microscopio ottico durante il normale funzionamento dei dispositivi.

### 5.2.1 *Electrical Breakdown. Difetti locali. Void*

Il fenomeno della conduzione dielettrica si verifica di solito quando il nitruro di silicio è di scarsa qualità ovvero con bassa resistività (RF-PECVD); in tal caso può essere accompagnato allo sviluppo di gas: fenomeno visibile in acqua (fig. 5.1(a)) ed eventualmente dal distacco parziale o totale dell'elettrodo superiore del cMUT (fig. 5.1(b)). Tuttavia anche miglioran-

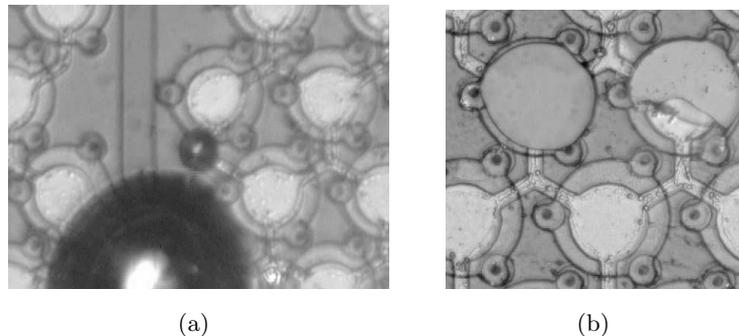


Figura 5.1: Sviluppo di gas in acqua (a). Distacco parziale o totale dell'elettrodo superiore del cMUT (b).

do la qualità del nitruro di silicio in termini di aumento della resistività (DF-PECVD), il fenomeno può ugualmente verificarsi quando la qualità del processo è scadente ovvero quando si formano particolati nella fase di deposizione: questi possono dar luogo a cortocircuiti. Una volta innescato il meccanismo di scarica elettrica fra i due elettrodi, esso può procedere a catena e coinvolgere anche vaste aree del dispositivo (fig. 5.2).

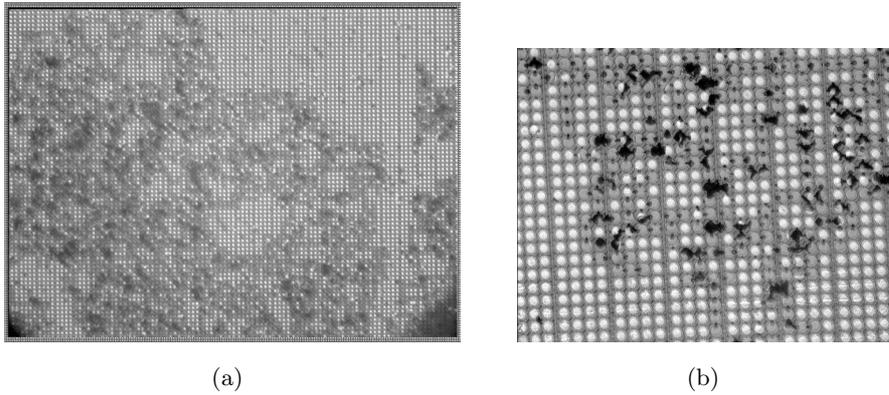


Figura 5.2: Danneggiamento del cMUT dovuto a scariche fra i due elettrodi. Visione d'insieme (a). Visione ingrandita (b).

Il problema della contaminazione di particelle riguarda sia il processo RF-PECVD che quello DF-PECVD ed è riconducibile a diversi fattori. Nei processi che utilizzano plasma i gas utilizzati generano frammenti di vario tipo (ioni, elettroni) che possono combinarsi per formare particelle con piccola carica negativa, tali particelle si raccolgono all'interfaccia con le guaine del plasma e possono cadere sul wafer quando si spegne il generatore RF, se non vengono adeguatamente evacuate dal sistema di aspirazione della camera. Un altro problema è rappresentato dalla presenza di film di polimeri che vengono a formarsi sulle pareti della camera. Gli stress, ad esempio quelli prodotti da cicli termici, possono provocare la frattura

di questi film generando particolati. La presenza di particelle indesiderate durante il processo di deposizione ed *etching* può provocare *void* (porosità) (fig. 5.3) oppure difetti localizzati che possono provocare, ad esempio, la creazione di fori d'attacco troppo piccoli e quindi compromettere la rimozione del cromo sacrificale (fig. 5.4).

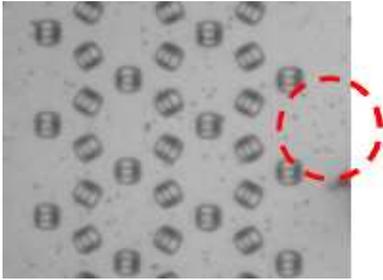


Figura 5.3: *Void*

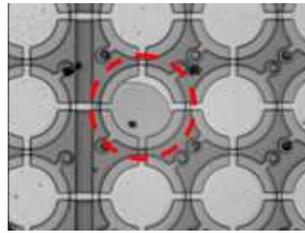


Figura 5.4: Rimozione parziale del cromo sacrificale.

Il problema della presenza di particolati può essere affrontato in primo luogo migliorando la qualità della camera pulita e dei dispositivi utilizzati per maneggiare i materiali ed i wafer; in secondo luogo è importante prestare notevole cura alla pulizia sia del wafer sia della camera di deposizione durante le varie fasi del processo cMUT. Diverse soluzioni sono state proposte per ridurre ulteriormente la contaminazione da particelle. Selwyn *et. al.* [31] consigliano di ridurre gradualmente l'alimentazione del generatore RF cosicché le particelle localizzate nelle guaine del plasma possano cadere più lentamente ed essere pertanto evacuate dal sistema di aspirazione della camera. Un sistema per la rimozione di particelle poco aderenti alla superficie del wafer e di dimensioni superiori a  $0.1 \mu\text{m}$ , prevede l'utilizzo di un plasma prodotto da un gas inerte come l'argon per sollevare le particelle ed allontanarle [32].

### 5.2.2 Penetrazione di acqua nelle microcelle cMUT

Si tratta di un fenomeno molto frequente (fig. 5.5). La penetrazione di acqua all'interno delle microcelle riduce drasticamente le prestazioni del trasduttore, diminuisce la frequenza di risonanza (vedi par. 6.4) delle membrane e spesso può dar luogo a correnti di perdita tra i due elettrodi che pregiudicano il funzionamento di interi elementi.

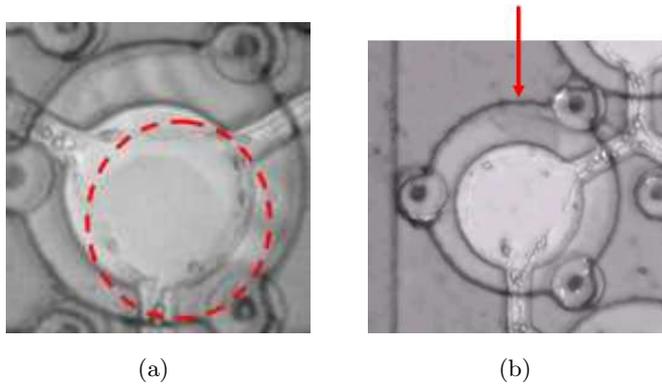


Figura 5.5: Penetrazione di acqua nella microcella cMUT.

Il problema è imputabile essenzialmente al grado di porosità del nitruro di silicio che costituisce sia il materiale strutturale delle membrane che lo strato protettivo del dispositivo. Le proprietà elettromeccaniche e le caratteristiche del nitruro variano notevolmente a seconda della tecnica di deposizione utilizzata (PECVD oppure LPCVD). In particolare, il nitruro PECVD è tipicamente non stechiometrico e presenta una elevata percentuale di idrogeno (circa il 20-30% della sua composizione atomica). Proprio quest'ultimo è responsabile delle diverse proprietà elettriche e meccaniche (inferiore densità, resistività e modulo di Young) nonché della maggiore porosità e quindi della minore impermeabilità all'acqua rispetto al nitruro LPCVD.

Molto è stato fatto per migliorare la qualità del nitruro PECVD (passaggio dalla tecnologia RF-PECVD a quella DF-PECVD) [29], tuttavia attualmente il grado di impermeabilità ottenuto dal nitruro DF-PECVD non è ancora adeguato; l'unica soluzione per l'utilizzo del cMUT in acqua è quella di proteggere il trasduttore con un idoneo strato di gomma silicica.

Un altro problema da non sottovalutare, legato alla porosità del nitruro di silicio RF-PECVD, è il possibile danneggiamento dell'elettrodo inferiore nella fase di *wet etching* per la rimozione del cromo sacrificale. La tecnologia DF-PECVD consente una crescita conforme del nitruro di silicio sull'elettrodo inferiore ed una bassa porosità garantendo un adeguato grado di protezione nella fase di rimozione del cromo sacrificale.

### 5.3 Problemi nella litografia ottica

La realizzazione di trasduttori cMUT, come illustrato nel capitolo 1, avviene secondo le classiche tecniche di *surface micromachining*. Il dispositivo viene realizzato secondo un certo numero di fasi successive che consentono di ottenere strutture complesse sovrapponendo diversi strati di film sottili: la forma geometrica desiderata viene ricavata utilizzando la litografia ottica. Si tratta di un processo che permette il trasferimento di un *pattern* da una maschera ad un sottile strato di materiale sensibile alla radiazione (chiamato *resist*) che copre la superficie dello strato depositato sul wafer. Il processo si realizza tramite l'allineamento della maschera sul resist e l'esposizione alla radiazione UV impressionando le parti di resist non coperte dalla maschera. Nella fase successiva le sagome di resist vengono ricavate con un liquido di sviluppo che rende solubili le parti impressionate dalla radiazione UV. Per ricavare le strutture desiderate dal film depositato è necessario rimuovere (*etching*) in maniera selettiva le parti non mascherate.

Il processo di litografia ottica, per la sua complessità, può dar luogo a

difetti locali che possono compromettere le prestazioni e l'affidabilità dei trasduttori cMUT. I problemi più ricorrenti riscontrati riguardano difetti sugli elettrodi; in particolare quelli sull'elettrodo superiore sono visibili al microscopio ottico (fig. 5.6). Questo genere di problemi può attribuirsi a

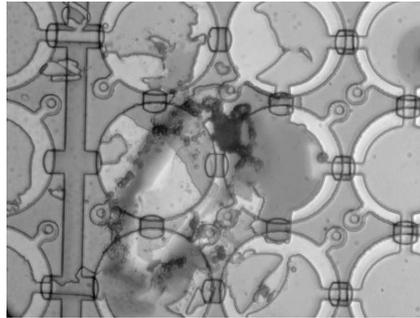


Figura 5.6: Difetti locali: elettrodo superiore danneggiato.

cause diverse:

- La pulizia non accurata del wafer o la cattiva qualità della sostanza utilizzata nel *priming* possono peggiorare l'aderenza del resist al wafer.
- L'utilizzo di resist di cattiva qualità o deteriorato con il tempo potrebbe non garantire più le caratteristiche di protezione quando viene a contatto con il solvente di sviluppo.
- Velocità e/o tempi di *spinning* errati possono dar luogo ad una stesura non uniforme del resist sulla superficie del wafer.
- Il *pre-bake* (riscaldamento pre-esposizione) di solito migliora l'adesione del resist al wafer, tuttavia tempi di riscaldamento eccessivi possono provocare stress nella pellicola alterando la sua capacità di protezione nel contatto col solvente di sviluppo.

- Tempi di sviluppo eccessivi possono dar luogo a fenomeni di *under-etching* ovvero la rimozione di materiale anche nelle parti sottostanti il resist di protezione.

Un insieme di queste cause può provocare perfino la rimozione del nitruro di silicio strutturale delle microcelle (fig. 5.7). Le fasi più critiche del processo

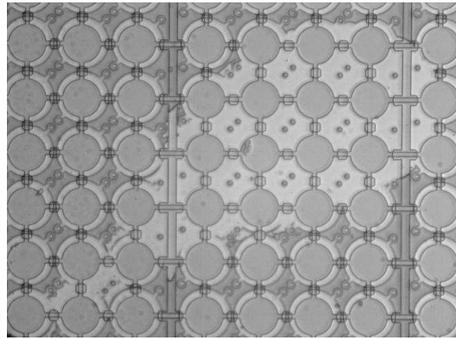


Figura 5.7: Difetti locali: rimozione nitruro di silicio strutturale.

cMUT sono l'allineamento della maschera per la creazione dell'elettrodo superiore e la realizzazione dei fori di attacco (per la rimozione del cromo sacrificale). Nel primo caso, l'elettrodo potrebbe non essere al centro della membrana (fig. 5.8) causando modi spuri di vibrazione. Nel secondo caso oltre all'allineamento della maschera un fattore critico è la scelta dell'esatto tempo di sviluppo per non creare fori di dimensioni errate: troppo grandi potrebbero dar luogo, nella successiva fase di etching, al danneggiamento dello strato protettivo dell'elettrodo inferiore, troppo piccoli potrebbero compromettere l'eliminazione del cromo sacrificale (fig. 5.9).

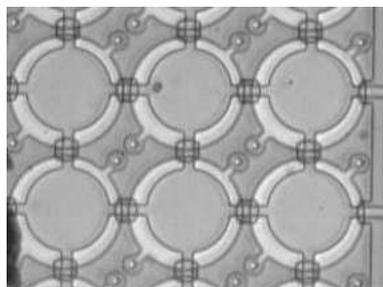
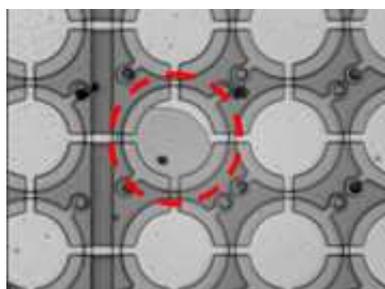
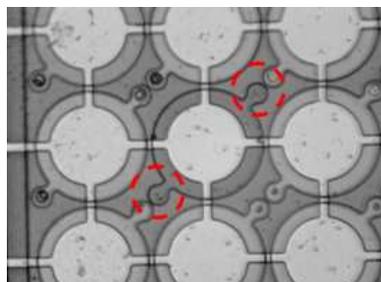


Figura 5.8: Difetti locali: elettrodo superiore decentrato.



(a)



(b)

Figura 5.9: Difetti locali: cromo sacrificiale non rimosso.

## Capitolo 6

# Caratterizzazione interferometrica di trasduttori cMUT

La caratterizzazione effettuata otticamente (cap. 5) permette di individuare alcuni difetti strutturali legati essenzialmente al processo di fabbricazione ovvero: alla qualità dei materiali utilizzati, alla cura dell'operatore nelle varie fasi di lavorazione, al grado di pulizia, alle tecniche di *micromachining* impiegate, alla qualità delle macchine e alle caratteristiche del nitrato di silicio realizzato. I difetti riscontrati otticamente non sempre sono di facile individuazione e forniscono informazioni utili per valutare l'entità degli stessi e le conseguenze sul comportamento vibrazionale del trasduttore. Inoltre spesso non forniscono nessuna indicazione per qualificare la resa del processo tecnologico.

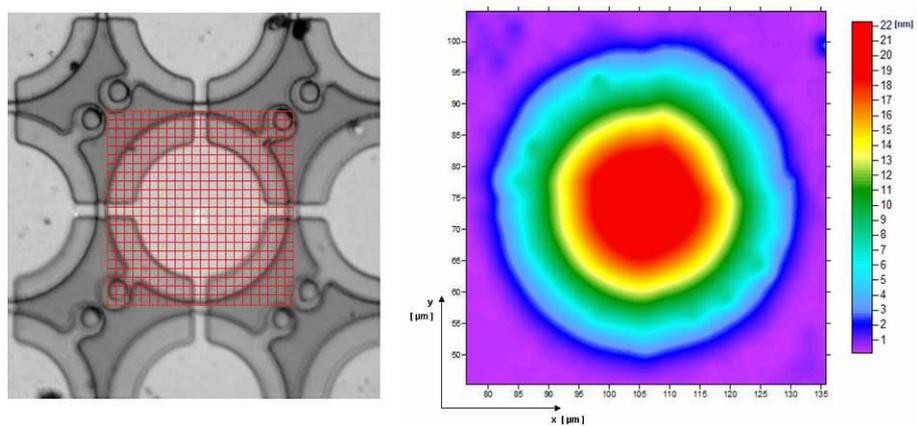
La caratterizzazione interferometrica, attraverso l'utilizzo dei software realizzati, offre la possibilità di studiare in maniera approfondita i difetti strutturali e consente l'analisi del reale comportamento vibrazionale dei dispositivi cMUT in diverse condizioni operative permettendo un confronto

con i risultati delle simulazioni FEM. La misura di alcune grandezze caratteristiche del dispositivo quali la frequenza di risonanza e la tensione di collasso permette da un lato la valutazione dell'affidabilità dei modelli simulati, dall'altro offre la possibilità di calcolare i valori di alcune proprietà strutturali del nitruro di silicio. Tali valori possono variare considerevolmente a seconda della qualità del processo di fabbricazione. Conoscere queste grandezze permette di migliorare l'accuratezza dei modelli FEM.

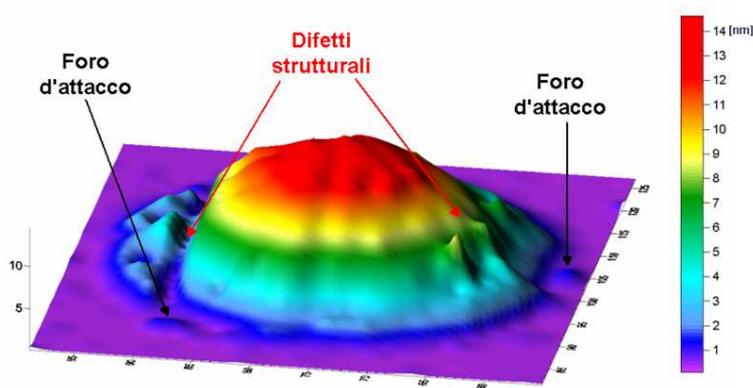
## 6.1 Mappa di deformazione

Il software MCP permette di effettuare un'analisi dettagliata all'interno dell'area visibile dalla videocamera. Pertanto a seconda del tipo di ingrandimento utilizzato per il microscopio l'estensione dell'area interessata può variare notevolmente. La risoluzione spaziale nella scansione della superficie dipende dalle dimensioni dello *spot* del laser e quindi anch'essa varia a seconda del tipo di obiettivo utilizzato, come riportato nella tab. 3.4. Considerate le dimensioni delle membrane dei trasduttori cMUT, l'impiego di un obiettivo 50x ed una griglia di scansione di 5x5 pixel permette di effettuare una mappa della deformazione di una singola membrana con un passo di  $1.35 \mu\text{m}$  ed uno *spot* di  $1 \mu\text{m}$  per il fascio laser. Il risultato permette di valutare il buon funzionamento della membrana in aria nelle normali condizioni operative (fig. 6.1(a)). Nel caso in cui siano presenti difetti strutturali essi risultano evidenti dalle mappe di vibrazione (fig. 6.1(b)).

A volte può risultare utile analizzare una porzione del dispositivo per studiare il comportamento vibrazionale di un gruppo di membrane. Nel caso in cui la caratterizzazione ottica evidenzi l'esistenza di un difetto locale, spesso è necessario avvalersi di un'indagine interferometrica per comprenderne a fondo la natura. La figura 6.2 mostra una delle membrane con un'area di colore più scuro: potrebbe trattarsi di un difetto superficiale



(a)



(b)

Figura 6.1: Mappe di deformazione. Una membrana integra (a). Una membrana con difetti (b).

oppure di un problema all'interno della microcella del cMUT. La mappa di deformazione mostra chiaramente che la porzione di dispositivo presenta membrane con comportamento non uniforme e la membrana di interesse non è libera di muoversi. L'ipotesi più plausibile in questo caso è la presenza di crono sacrificale all'interno della cavità.

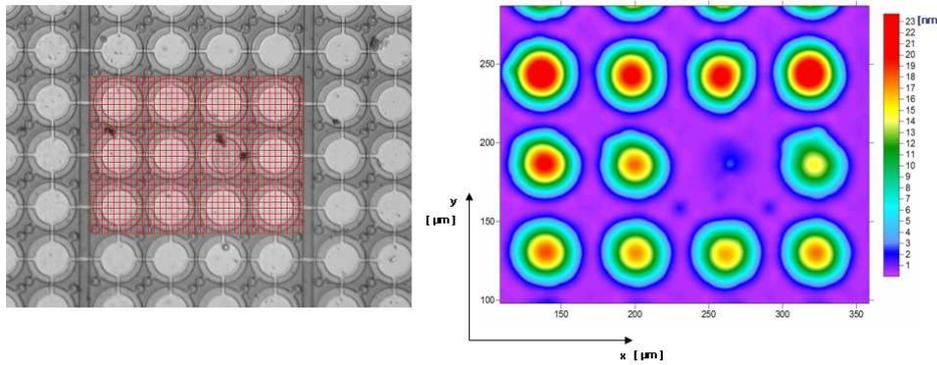


Figura 6.2: Mappa di deformazione di un gruppo di membrane. Un difetto visibile.

Nel caso di trasduttori cMUT realizzati con procedimento *Reverse* il numero di difetti superficiali può essere molto elevato. La natura di questi ultimi non è facilmente determinabile in quanto, la fase di lavorazione che porta alla rimozione del nitrato e del silicio che coprono la membrana, può provocare problemi di vario genere. Anche in questo caso la caratterizzazione interferometrica fornisce informazioni utili per comprendere il tipo di problema e le sue cause. In figura 6.3 è visibile la superficie di un trasduttore di tipo *Reverse* con un difetto esteso che ricopre le membrane.

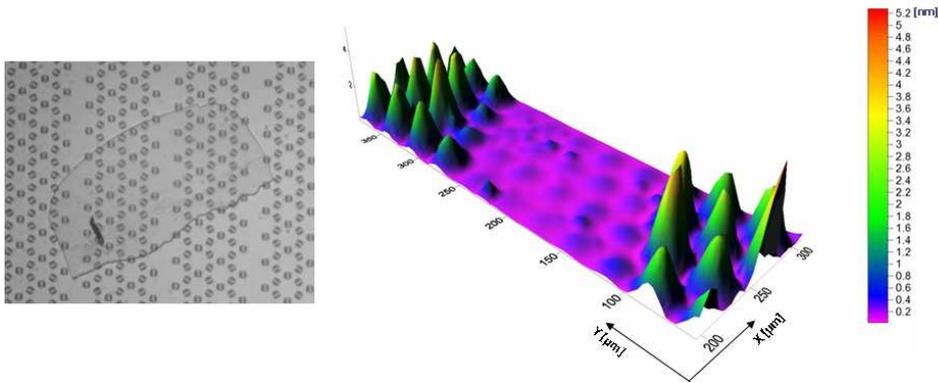


Figura 6.3: Difetto superficiale e mappa di deformazione.

La mappa di vibrazione mostra chiaramente che quest'ultima, anche nella regione interessata, producono uno spostamento della superficie seppure di ampiezza minima rispetto al resto del trasduttore. Dal momento che il difetto è trasparente probabilmente si tratta di un frammento di nitruro depositato sulla superficie durante la fase di lavorazione. Un'adeguata pulizia del dispositivo permette la rimozione senza danneggiare il cMUT.

In alcuni casi risulta difficile comprendere la natura dei difetti se si considera solo la mappa di deformazione. La ricostruzione, operata dal programma MCP, del movimento della superficie del trasduttore consente di ottenere informazioni aggiuntive molto utili. La figura 6.4 mostra un trasduttore *Reverse* nel quale una membrana presenta delle zone più scure in corrispondenza delle interconnessioni elettriche con le membrane vicine. La mappa di vibrazione potrebbe indurre a credere che all'interno della cavità il cromo sacrificale non è stato rimosso completamente. La distribuzione spaziale della differenza di fase fra il segnale di eccitazione del trasduttore ed il segnale di spostamento mostrano chiaramente che la membrana in esame non si muove in fase con le altre. Gli altri punti bianchi nella figu-

ra 6.4 rappresentano errori di misura dovuti al posizionamento dello *spot* del laser in punti della superficie aventi bassa riflessività. Il movimento della membrana sembra prodotto esclusivamente da *crosstalk* meccanico pertanto potrebbe esserci un problema nelle interconnessioni elettriche con le membrane vicine; il fenomeno necessita comunque di ulteriori approfondimenti.

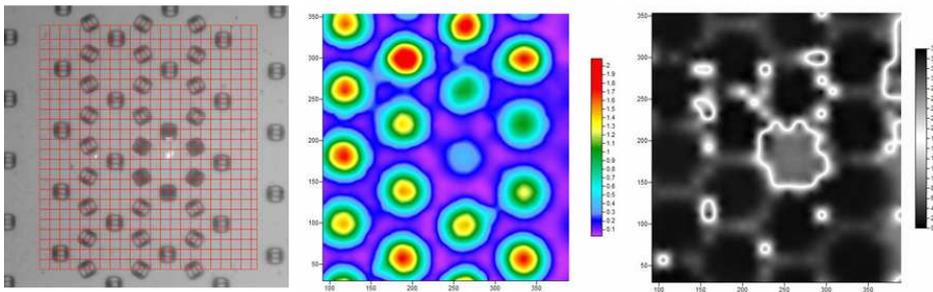


Figura 6.4: Difetto su una membrana. Mappa di deformazione. Sfasamento tra segnale eccitazione e segnale di spostamento.

Lo studio del comportamento vibrazionale dei trasduttori cMUT effettuato tramite le mappe di vibrazione ha permesso di comprendere l'influenza delle interconnessioni elettriche e dei fori d'attacco sulla deformazione della membrana. In questo modo è stato possibile migliorare il grado di impacchettamento delle membrane al fine di massimizzare la superficie radiante. Nella figura 6.5 sono illustrate le membrane di diversi tipi di trasduttori cMUT progettati negli ultimi anni presso il laboratorio ACULAB. Le caratteristiche di ciascuna configurazione sono riportate di seguito:

- (a): Elettrodo superiore circolare; 3 interconnessioni elettriche; 3 fori d'attacco esterni all'elettrodo.

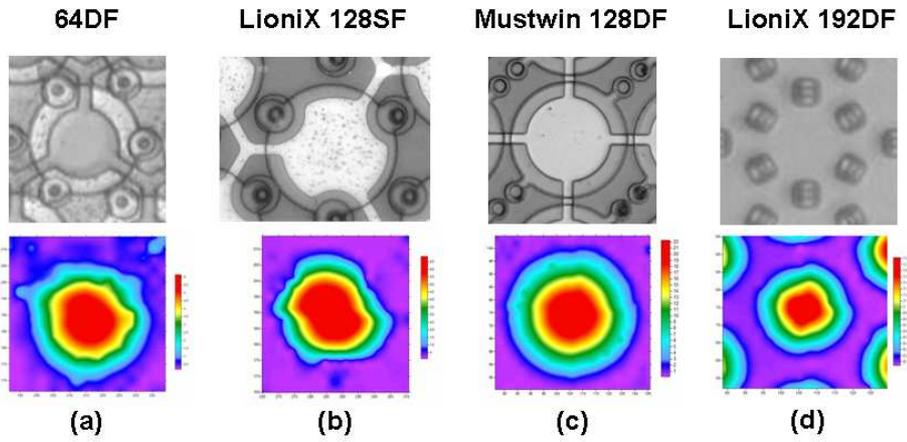


Figura 6.5: Membrane di diversi tipi di trasduttori cMUT.

- (b): Elettrodo superiore non circolare con 3 fori d'attacco molto vicini; 3 interconnessioni elettriche.
- (c): Elettrodo superiore circolare; 4 interconnessioni elettriche; 2 fori d'attacco lontani dall'elettrodo.
- (d): Elettrodo superiore circolare; 6 interconnessioni elettriche; 2 fori d'attacco non visibili, diametralmente opposti, lontani dall'elettrodo.

La posizione dei fori d'attacco influenza notevolmente la forma della deformazione: le membrane (c) e (d) con elettrodo circolare e due soli fori lontani da esso, presentano una deformazione perfettamente circolare. Questo permette di massimizzare l'impacchettamento delle membrane, disponendole su righe sfalsate (fig. 6.6), con conseguente aumento della superficie radiante. L'utilizzo di un minor numero di fori d'attacco, d'altra parte, provoca un aumento del tempo necessario per la rimozione del cromo sacrificale all'interno della cavità del cMUT. Le misure evidenziano che il numero di interconnessioni elettriche non influenza la deformazione della membrana.

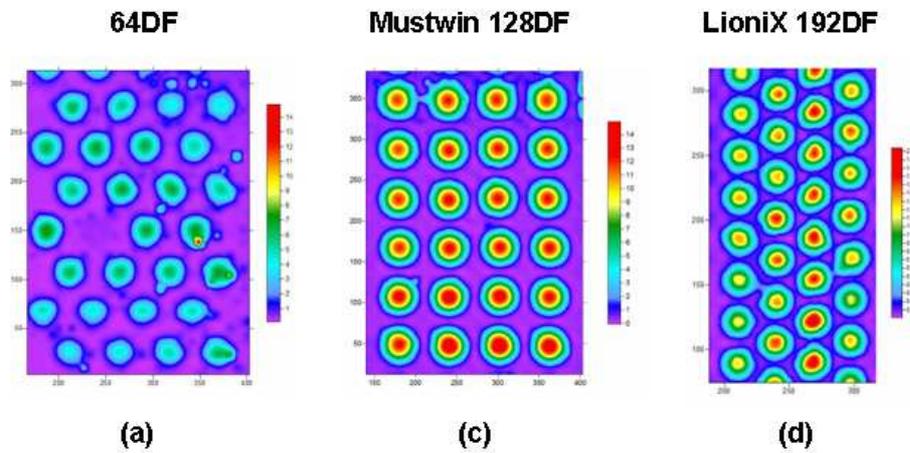


Figura 6.6: Diversi tipi di traduttori cMUT: mappe di deformazione.

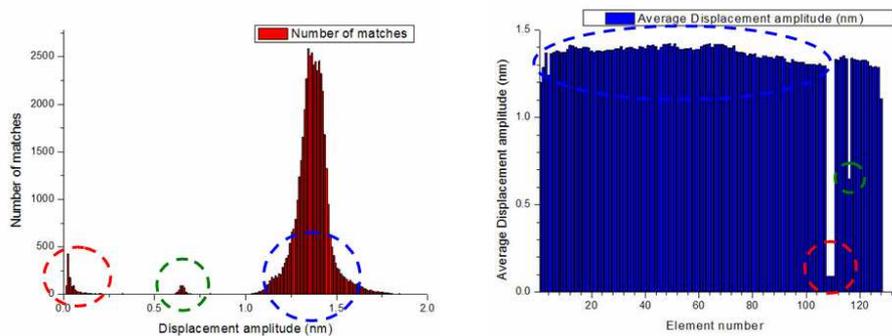
## 6.2 Analisi vibrazionale dell'intera superficie

Le convenzionali sonde piezoelettriche per ecografia medica presentano elementi dal comportamento vibrazionale uniforme pertanto non è necessario disporre di strumenti adeguati alla valutazione della resa del processo tecnologico di fabbricazione. Il degradamento delle prestazioni nel tempo, dovuto allo stress dei materiali nonché alla delaminazione della lente acustica e del *matching layer*, viene valutato solitamente tramite misure di capacità elettrica e di *pulse-echo* in acqua sui singoli elementi dell'*array*. La presenza di due elementi contigui non funzionanti, in un trasduttore di 128 elementi, non influenza in maniera significativa la qualità dell'immagine ecografica, tuttavia produce un peggioramento delle prestazioni nella modalità di *imaging* Doppler [33]. Questo è dovuto essenzialmente all'incremento dei lobi laterali del fascio acustico. Il danneggiamento di un numero di elementi superiori a quattro si traduce in una diminuzione della risoluzione spaziale e del contrasto dell'immagine nonché una minore capacità di penetrazione

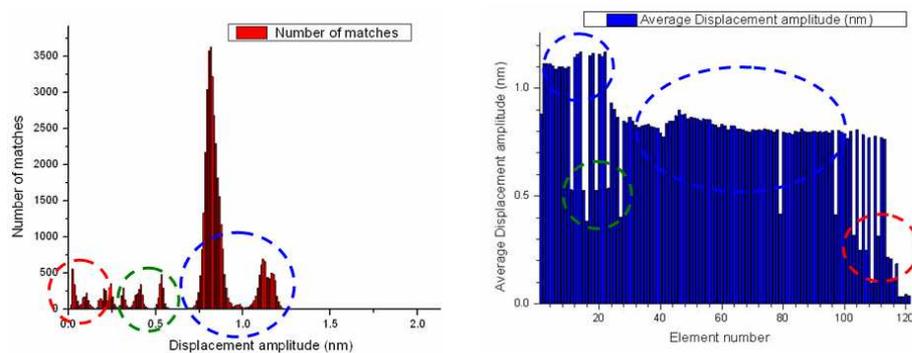
del fascio acustico.

Anche nel caso di trasduttori cMUT la misura dei parametri elettroacustici consente di valutarne le prestazioni. Tuttavia, al fine di esaminare la qualità del processo tecnologico, risulta utile disporre di uno strumento per l'analisi di tutte le microcelle che compongono l'*array*. I dispositivi cMUT essendo costituiti da un elevato numero di membrane, possono presentare all'interno dello stesso elemento zone con comportamento diverso, gruppi di microcelle non funzionanti o con prestazioni diverse. Il programma TSA realizzato in questo lavoro di Tesi, consente di valutare la resa del processo di fabbricazione ed il grado di uniformità di quest'ultimo sia sul singolo *die* che sul wafer. Uno studio di questo genere non è stato fino ad oggi mai realizzato sugli *array* cMUT. Si tratta di un'analisi particolarmente utile soprattutto quando si sceglie una nuova *foundry* o quando si effettuano modifiche rilevanti sul processo tecnologico e/o sui materiali impiegati. La figura 6.7(a) mostra i risultati di una scansione effettuata su tutte le membrane (47616) di un trasduttore cMUT a 128 elementi. L'istogramma di spostamento risulta di facile interpretazione: gli elementi non funzionanti sono cerchiati in rosso, quelli aventi solo un certo numero di microcelle funzionanti sono cerchiati in verde. Il picco principale dell'istogramma, cerchiato in blu, rappresenta gli elementi funzionanti ed aventi un comportamento uniforme: questo è visibile dal grafico che riporta lo spostamento medio di ciascun elemento (fig. 6.7(a)).

Nel caso in cui siano presenti nel trasduttore due zone con prestazioni diverse, questo appare evidente dall'istogramma di spostamento: in tal caso il picco principale risulterà diviso in due come illustrato dal cerchio blu nella figura 6.7(b).



(a)



(b)

Figura 6.7: Istogramma di spostamento e Spostamento medio di ciascun elemento: zone del trasduttore con differenti prestazioni.

Un trasduttore con comportamento vibrazionale uniforme è caratterizzato da un istogramma con un unico picco molto stretto e pronunciato (fig. 6.8). Le misure effettuate sui trasduttori cMUT progettati presso

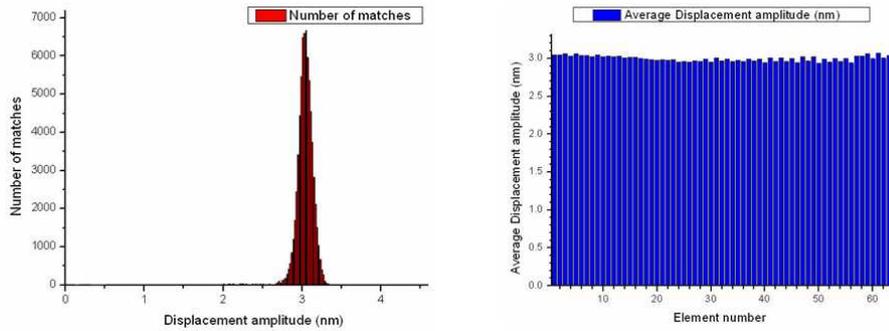


Figura 6.8: Istogramma di spostamento e Spostamento medio di ciascun elemento: trasduttore con comportamento vibrazionale uniforme.

il laboratorio ACULAB hanno evidenziato che, nel caso migliore in cui tutti gli elementi risultino funzionanti, la percentuale di membrane non funzionanti su un *array* di 128 elementi costituito da 47616 membrane, può variare da 0.2% a 1.6%. Nel caso di trasduttori a 64 elementi costituiti da 73728 microcelle, tali percentuali variano da 0.3% a 1.7%. Tali risultati, molto soddisfacenti, evidenziano che la resa del processo tecnologico messo a punto è alquanto elevata.

Una ulteriore informazione che si può ricavare dall'analisi effettuata con il software TSA riguarda il grado di uniformità del processo tecnologico e del nitruro di silicio sul wafer. La figura 6.9 mostra la distribuzione della massima ampiezza di spostamento delle membrane nel caso di due *die* adiacenti sullo stesso wafer.

I tempi di scansione richiesti dal programma TSA per effettuare un'analisi completa di un trasduttore cMUT costituito di 47616 membrane, sono

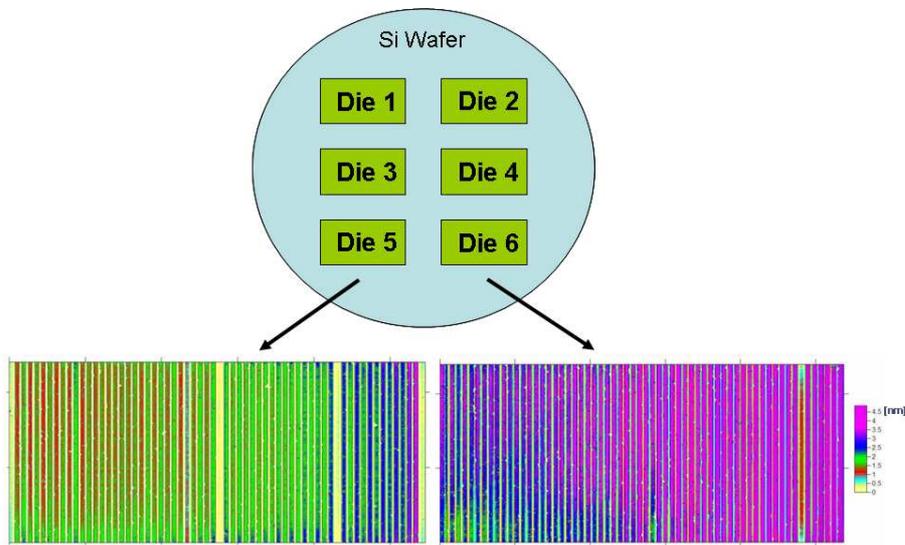


Figura 6.9: Comportamento vibrazionale di due trasduttori adiacenti sullo stesso wafer.

di circa 21 ore. Questo risultato dipende fortemente dal tempo impiegato dall'oscilloscopio per eseguire un determinato numero di medie nella misura di spostamento su ciascuna membrana. D'altra parte un numero di medie troppo basso può produrre risultati errati nel caso in cui la riflessività della superficie del trasduttore sia scarsa. Dalle misure effettuate è stato possibile stabilire che 128 medie sono un numero adatto per minimizzare i tempi di scansione senza compromettere la validità delle misure. Dal momento che l'analisi di tutte le microcelle del trasduttore richiede tempi così elevati, l'uso del software TSA rimane confinato alla valutazione del processo tecnologico: è impensabile il suo utilizzo per la verifica di funzionamento di tutti i dispositivi prodotti. Esiste la possibilità di eseguire la scansione in tempi ragionevoli (circa 2 ore e 30 minuti) se si riduce l'area di scansione ad una porzione ridotta dell'*elevation* (un ottavo). Questa procedura offre

ottimi risultati quando i trasduttori presentano un comportamento vibrazionale uniforme nella direzione dell'*elevation*. Gli *array* cMUT, progettati nel laboratorio ACULAB, hanno mostrato questa caratteristica. Come si può verificare, la scansione completa della superficie (fig. 6.10(a)) e quella su una porzione pari ad un ottavo dell'*elevation*, producono gli stessi istogrammi di spostamento. Pertanto una volta appurata l'uniformità nella direzione dell'*elevation*, nel caso in cui si voglia effettuare un'analisi in tempi brevi, è possibile ridurre i tempi di scansione a circa 2 ore e 30 minuti eseguendo una scansione parziale del trasduttore.

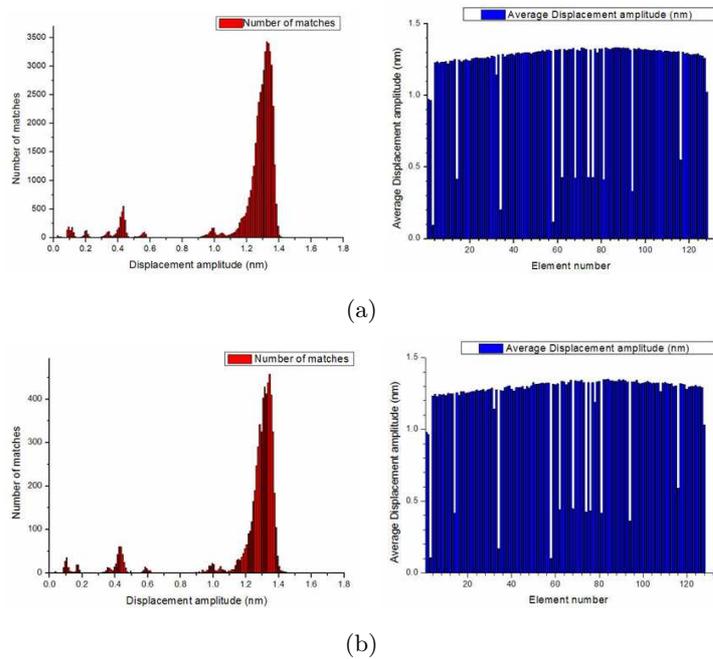


Figura 6.10: Valutazione del grado di uniformità nella direzione dell'*elevation*. Istogramma di spostamento e Spostamento medio di ciascun elemento: (a) mappa vibrazionale completa, (b) mappa vibrazionale di una porzione centrale pari ad un ottavo dell'*elevation*.

### 6.3 Collasso

Nelle normali condizioni operative, in un trasduttore cMUT, la forza di richiamo elastica della membrana è in grado di controbilanciare la forza elettrostatica che agisce tra i due elettrodi. Quando la tensione applicata raggiunge il valore della tensione di collasso ( $V_{coll}$ ) la parte centrale della membrana, in corrispondenza dell'elettrodo superiore, si attacca sul fondo della microcella. Pertanto la massima tensione applicabile al trasduttore risulta limitata da tale fenomeno. La membrana rimane in tale stato fino a quando, diminuendo la tensione di polarizzazione, non si raggiunge la tensione di *snap-back*. Essendo quest'ultima più bassa della tensione di collasso, il comportamento della membrana mostra una certa isteresi. La tensione di collasso media di un elemento cMUT può essere valutata tramite misure di impedenza elettrica infatti in corrispondenza di  $V_{coll}$  la capacità dell'elemento aumenta bruscamente; la tensione di *snap-back* invece corrisponde ad una improvvisa diminuzione della capacità. Poiché la tensione di collasso dipende sia dalla dimensione del *gap* che dalle caratteristiche geometriche e meccaniche della membrana, il suo valore può variare anche di alcune decine di volt da membrana a membrana. La stazione di misura realizzata permette di osservare grazie al microscopio ottico il fenomeno del collasso, sulle singole membrane, sia su trasduttori senza gomma sia su trasduttori ricoperti con una gomma siliconica trasparente (fig. 6.11). Questo ha permesso di comprendere più a fondo il fenomeno ed i problemi ad esso connessi. A volte risulta difficile determinare con esattezza la tensione di collasso tramite misure di impedenza: questo avviene di solito quando si vuole valutare la tensione di collasso su trasduttori coperti con gomma. L'analisi ottica ha permesso di stimare la  $V_{coll}$  anche in tali condizioni operative e di studiare l'influenza della gomma sulla tensione di collasso.

Il fenomeno del collasso risulta molto complesso da studiare con modelli analitici in quanto, per tensioni prossime a  $V_{coll}$ , il campo elettrico

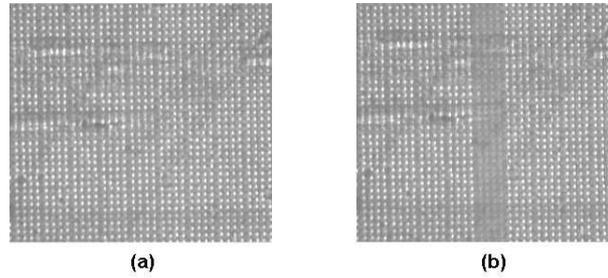


Figura 6.11: Trasduttore cMUT a 128 elementi ricoperto con gomma siliconica trasparente. (a) Prima del collasso. (b) Durante il collasso.

elevato tra i due elettrodi provoca un accumulo di carica all'interno dello strato di nitruro di silicio interposto tra i due elettrodi. A seconda della qualità del nitruro tale accumulo può essere più o meno consistente. Detto  $\alpha$  il rapporto tra la tensione di *bias* ( $V_{dc}$ ) e la  $V_{coll}$ , si può affermare che l'entità dell'accumulo di carica aumenta al crescere di  $\alpha$  al di sopra di 1. Le cariche intrappolate a seguito del fenomeno possono alterare consistentemente le specifiche del progetto del trasduttore: la frequenza di risonanza in assenza di *bias* ( $f_{R0}$ ) può diminuire anche di centinaia di kHz e la  $V_{coll}$  può aumentare anche del 17% rispetto al valore misurato al primo ciclo di collasso su un elemento integro. Le misure effettuate sui trasduttori progettati presso il laboratorio ACULAB hanno evidenziato che la qualità del processo tecnologico e del nitruro di silicio influenza notevolmente l'entità del fenomeno del *charging*. A volte l'accumulo di carica può risultare così consistente da determinare uno *snap-back* spontaneo della membrana in collasso nonostante la tensione di polarizzazione sia mantenuta costante al valore  $V_{coll}$ . I trasduttori *Standard* a 64 elementi realizzati con processo RF-PECVD hanno mostrato di essere più sensibili al fenomeno dell'accumulo di carica rispetto ai trasduttori *Standard* a 128 elementi fabbricati con processo DF-PECVD e con una nuova configurazione per gli elettrodi.

Entrambe i trasduttori sono stati polarizzati con  $\alpha$  pari a 1.55; riportando il *bias* a zero è stata misurata la diminuzione della  $f_{R0}$  causata dal *charging* per i due tipi di trasduttori. Nel cMUT a 64 elementi la  $f_{R0}$  è diminuita di 400 kHz mentre nel cMUT a 128 elementi la variazione è stata di soli 90 kHz: questo rappresenta un ottimo risultato. Un'altra considerazione interessante riguarda il grado di reversibilità del fenomeno di *charging*: è stato verificato che invertendo il segno della polarizzazione e riportando il trasduttore in collasso, la carica precedentemente accumulata viene liberata e il trasduttore viene ripristinato allo stato iniziale.

La caratterizzazione interferometrica permette di determinare in maniera più accurata il valore della tensione di collasso, sulle singole membrane del cMUT, rispetto alla valutazione fatta con il microscopio ottico. Inoltre permette di studiare il reale comportamento vibrazionale in tale condizione operativa evidenziando i difetti legati al processo tecnologico. Nella figura 6.12 sono messe a confronto le membrane in collasso di due dispositivi diversi: risulta evidente la diversa resa del processo di fabbricazione.

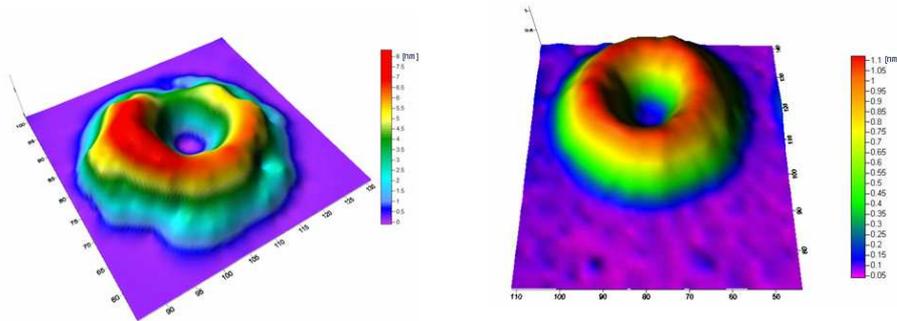


Figura 6.12: Membrane in collasso di due diversi tipi di trasduttori. Differente resa del processo di fabbricazione.

## 6.4 Spettro di spostamento

La caratterizzazione elettrica di un trasduttore cMUT operante in aria permette di valutare, in maniera semplice e veloce, la frequenza di risonanza meccanica media del singolo elemento dal valore corrispondente al massimo della parte reale della curva di impedenza. Il valore ottenuto rappresenta la frequenza di risonanza media di tutte le membrane dell'elemento. Le misure di impedenza effettuate su tutti gli elementi dell'*array* forniscono un'indicazione sul grado di uniformità "globale" del processo di fabbricazione sia sul singolo *die* che sul wafer. La misura dello spettro di spostamento di una o più membrane eseguita con il vibrometro consente una valutazione "locale" del comportamento vibrazionale della superficie del cMUT e fornisce informazioni più dettagliate per esaminare in grado di uniformità e quindi la resa del processo tecnologico. La misura dello spettro di spostamento della singola membrana viene effettuata in maniera completamente automatica dal software DSA variano la frequenza di eccitazione da un valore minimo ad un valore massimo con incrementi costanti. È possibile eseguire la misura secondo due metodologie diverse a seconda che si polarizzi o meno il trasduttore con una tensione continua. Dal momento che nel cMUT la forza elettrostatica dipende dal quadrato della tensione applicata agli elettrodi della microcella, l'utilizzo di una eccitazione sinusoidale senza alcuna tensione di *bias* produce una risposta di spostamento della membrana a frequenza doppia rispetto all'eccitazione applicata. In questa misura pertanto il generatore di funzioni esegue uno *sweep* su un intervallo di frequenze tale da massimizzare lo spostamento della membrana, la cui oscillazione avviene a frequenza doppia. Questo metodo permette di determinare in maniera esatta il valore di frequenza  $f_{R0}$  corrispondente a polarizzazione nulla. Questo tipo di misura, essendo il livello del segnale di spostamento molto piccolo, richiede l'utilizzo di un numero di medie superiore a 1024 per ciascuno *step* in frequenza utilizzato nella realizzazione dello spettro di spostamento. Il metodo di misura che utilizza una tensione

di polarizzazione permette di eseguire uno spettro di spostamento utilizzando un numero di medie decisamente inferiore (32). Il generatore di funzioni esegue uno *sweep* su un intervallo di frequenze tale da massimizzare lo spostamento della membrana, la cui oscillazione avviene alla stessa frequenza dell'eccitazione. La figura 6.13 mette a confronto i due metodi ora descritti. La misura senza *bias* è stata eseguita con un segnale di eccitazione di

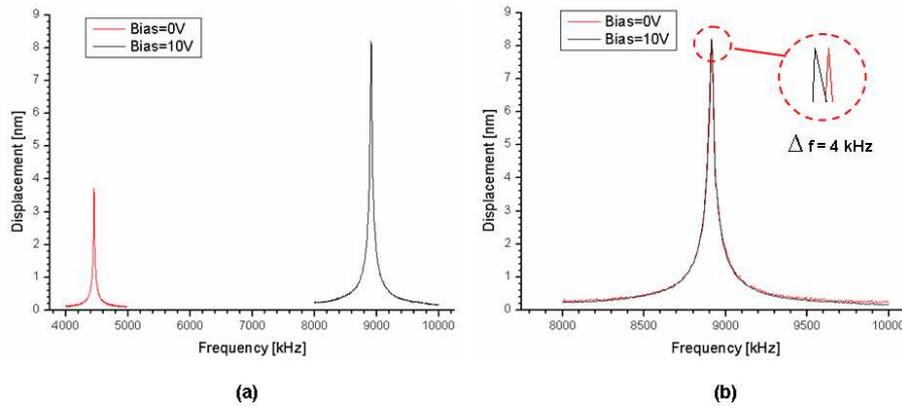


Figura 6.13: Metodi per la misura della frequenza di risonanza in aria: metodo con e senza *bias* a confronto.

ampiezza pari a 7.5 V ed uno *sweep* in frequenza da 4 MHz a 5 MHz con *step* di 2.5 kHz. La misura con *bias* è stata effettuata con una tensione di polarizzazione continua di 10 V ed un segnale di eccitazione sinusoidale di ampiezza pari a 2 V ed uno *sweep* in frequenza da 8 MHz a 10 MHz con *step* di 5 kHz. Come si può notare (fig. 6.13(a)), nella misura con *bias* la risposta di spostamento della membrana risulta massima in corrispondenza della frequenza di eccitazione, nel caso di misura senza *bias* è massima per una frequenza di eccitazione metà, sebbene la membrana oscilla a frequenza doppia. I due metodi possono essere messi a confronto riportando le misure sullo stesso intervallo di frequenza e scalando le ampiezze dei segnali.

La figura 6.13(b) mostra che i due metodi producono spettri di spostamento identici ma traslati in frequenza di 4 kHz. Tale differenza è dovuta al fatto che il metodo con *bias* non misura la  $f_{R0}$  ma rileva una frequenza di risonanza inferiore a causa del fenomeno noto come *spring softening*.

Lo spettro di spostamento di una membrana cMUT in aria fornisce utili indicazioni sul comportamento vibrazionale della microcella. Le misure effettuate sui trasduttori cMUT hanno mostrato che la realizzazione di spettri di spostamento con *step* in frequenza di 10 kHz sono più che sufficienti per evidenziare possibili asimmetrie dell'elettrodo o difetti locali imputabili al processo di fabbricazione che possono dar luogo a modi spuri di vibrazione (fig. 6.14). Questi ultimi possono derivare anche da componenti indesiderate di vibrazioni *in-plane*: esse pur non essendo rilevabili con il vibrometro utilizzato nella stazione di misura, possono risultare nello spettro di spostamento come modi spuri di vibrazione.

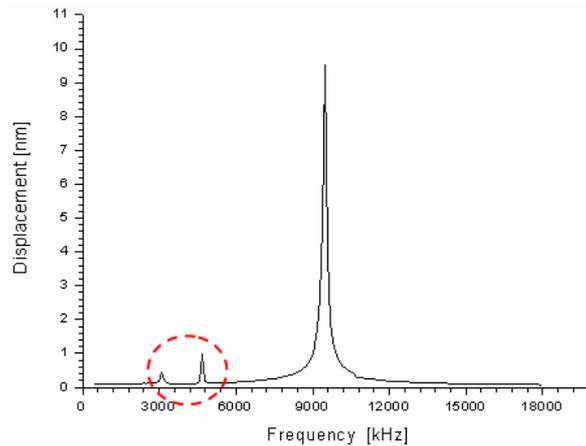


Figura 6.14: Spettro di spostamento di una membrana cMUT in aria: sono presenti modi spuri di vibrazione.

Il software DSA permette di effettuare in automatico spettri di sposta-

mento in punti della superficie del trasduttore scelti a piacere all'interno dell'area visibile dalla videocamera. Questo consente di valutare in maniera "locale" la dispersione della frequenza di risonanza su un certo numero di membrane. I risultati offrono utili informazioni per esaminare la qualità del processo di deposizione del nitruro di silicio e il grado di variazione delle grandezze geometriche (diametro e spessore) della microcella che influenzano il valore della frequenza di risonanza della membrana. La figura 6.15 mostra gli spettri di spostamento eseguiti in aria su quattro membrane di due diversi trasduttori cMUT.

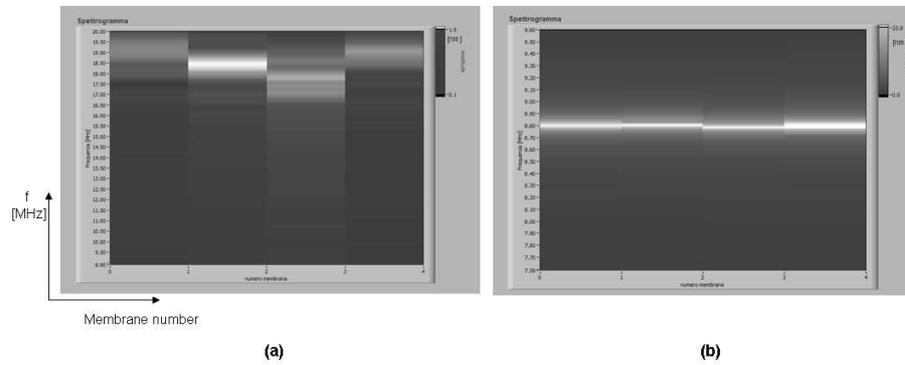


Figura 6.15: Spettri di spostamento per valutare la qualità del processo. (a) Trasduttore *Reverse* con processo di rimozione poco uniforme. (b) Trasduttore *Standard* con buona uniformità di processo.

La figura 6.15(a) si riferisce ad un dispositivo a 192 elementi realizzato con procedimento *Reverse*: la massima variazione della frequenza di risonanza rispetto al valor medio è pari al 7%. Si tratta di un valore elevato considerando che un trasduttore a 128 elementi fabbricato con procedimento *Standard* presenta una variazione massima tipicamente pari al 0.2%, 0.5% nel caso peggiore (fig. 6.15(b)). Nei trasduttori *Reverse* la fase

di lavorazione che porta alla rimozione del nitruro e del silicio che coprono la membrana è molto delicata: il controllo dell'uniformità del processo di rimozione tramite la misura degli spettri di spostamento si rivela utile per valutare la resa del processo di rimozione. Un interessante sviluppo del software DSA potrebbe riguardare la possibilità di eseguire in automatico gli spettri di spostamento su tutte le membrane lungo l'estensione dell'*elevation* o dell'*azimuth* per valutare la dispersione della frequenza di risonanza lungo tali direzioni.

Come esposto nel precedente paragrafo 5.2.2, nonostante un notevole sforzo sia stato fatto per migliorare la qualità del nitruro di silicio PECVD, il suo grado di impermeabilità non è ancora sufficiente per l'impiego del trasduttore senza un idoneo strato di gomma siliconica. Una metodologia valida per rilevare la presenza di acqua all'interno della microcella cMUT, si basa sull'utilizzo degli spettri di spostamento. Tanto maggiore è l'acqua contenuta nel *gap*, tanto più la frequenza di risonanza diminuisce rispetto al valore misurato su una membrana integra.

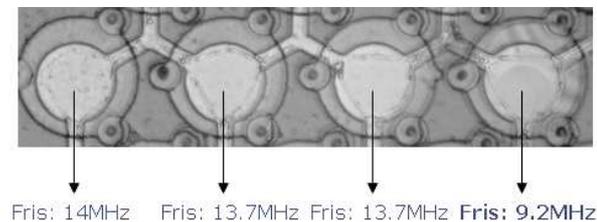


Figura 6.16: Trasduttore cMUT *Standard* realizzato con nitruro RF-PECVD. Variazione della frequenza di risonanza a causa della penetrazione di acqua nelle microcelle.

La figura 6.16 si riferisce ad un trasduttore cMUT di tipo *Standard*, a 64 elementi, realizzato con nitruro RF-PECVD caratterizzato da elevata po-

rosità. La frequenza di risonanza misurata su tutte e quattro le membrane, prima dell'utilizzo del trasduttore a contatto con l'acqua, è di 14 MHz. Dopo l'utilizzo in immersione il trasduttore risulta ancora funzionante ma la penetrazione di acqua nelle microcelle produce una variazione della frequenza di risonanza.

Un altro studio interessante realizzato con la stazione di misura riguarda la valutazione del fenomeno di *spring softening*: quanto più la tensione di *bias* si avvicina alla  $V_{coll}$ , tanto più la frequenza di risonanza della membrana diminuisce. La figura 6.17 mostra un confronto fra i risultati delle simulazioni FEM ed i valori misurati con il vibrometro su una membrana cMUT in aria. La misura è stata eseguita misurando, per un certo numero di valori di  $\alpha$ , i corrispondenti valori della frequenza di risonanza ( $f_R$ ) della microcella. Il grafico riporta l'andamento di ( $f_R$ ) normalizzato rispetto alla frequenza di risonanza misurata a zero *bias* ( $f_{R0}$ ): c'è un buon accordo tra le simulazioni ed i dati sperimentali. A tal proposito è importante

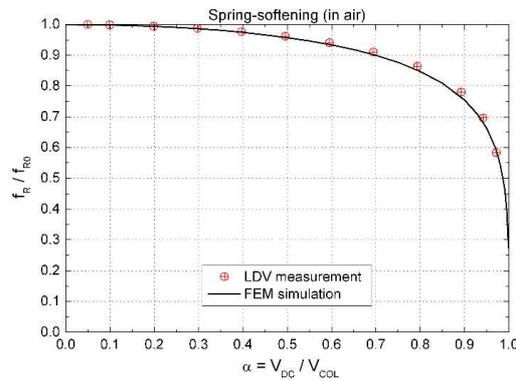


Figura 6.17: *Spring softening* di una membrana cMUT in aria.

sottolineare il fatto che la misura della frequenza di risonanza in aria e la valutazione della dispersione di quest'ultima sul singolo *die* e sul wafer,

permettono di calcolare alcune proprietà dei materiali, come ad esempio il modulo di Young: questo consente di migliorare l'accuratezza dei modelli FEM.

Le misure effettuate su un certo numero di membrane e su *die* diversi dello stesso wafer mostrano che, sebbene il valore di  $f_{R0}$  possa variare, l'andamento di  $f_R$  al variare di  $\alpha$  rimane molto simile (fig. 6.18). Per  $\alpha$  che varia da 0 a 0.99 la diminuzione di  $f_R$  rispetto ad  $f_{R0}$  è pari al 52.6%.

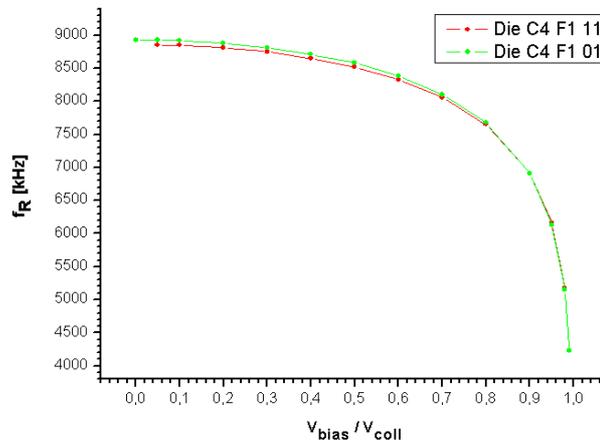


Figura 6.18: *Spring softening*, in aria, di membrane cMUT appartenenti a *die* diversi.

Come già accennato nel paragrafo 6.3 il fenomeno del *charging*, nel caso in cui si faccia lavorare il trasduttore per  $\alpha$  maggiori di 1, può far variare considerevolmente i valori di  $f_{R0}$  e di  $V_{\text{coll}}$ . La figura 6.19 mostra come trasla la curva, che rappresenta lo *spring softening*, dopo che il trasduttore è stato polarizzato con una tensione corrispondente ad  $\alpha$  pari a 1.55. La  $f_{R0}$  diminuisce di 90 kHz e la  $V_{\text{coll}}$  aumenta del 17.8%.

Per evitare i fenomeni di accumulo di carica è importante polarizzare sem-

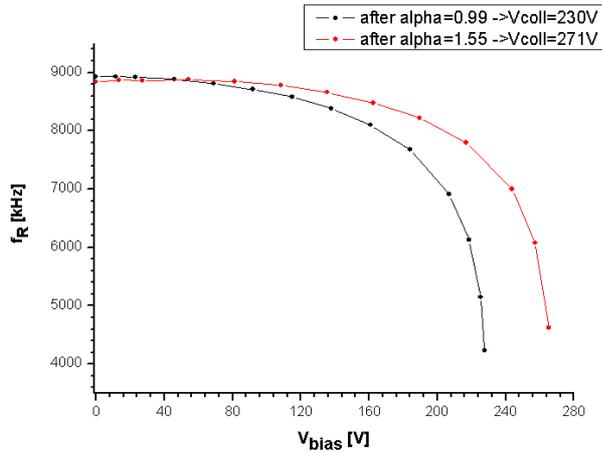


Figura 6.19: *Spring softening* di una membrana cMUT in aria. Variazione di  $f_{R0}$  e  $V_{coll}$  a seguito di un ciclo di polarizzazione fino ad  $\alpha=1.55$ .

pre il cMUT con valori di  $\alpha$  inferiori a 0.9. In tal caso risulta utile disporre di un metodo per stimare il valore della tensione di collasso senza portare il trasduttore ad  $\alpha=1$ , evitando i problemi legati al *charging*. L'obiettivo può essere raggiunto graficando, sulla base dei valori misurati, l'andamento di  $f_R$  al variare di  $\alpha$  fino ad  $\alpha=0.8$ , i successivi valori possono essere estrapolati dal momento che la curva (fig. 6.18) ha un andamento noto. In questo modo è possibile stimare con sufficiente accuratezza il valore di  $V_{coll}$ .

## Capitolo 7

# Caratterizzazione di differenti prototipi di trasduttori ultrasonici

La stazione di misura realizzata nell'ambito di questo lavoro di Tesi si è rivelata un valido strumento per la caratterizzazione interferometrica di generici trasduttori ultrasonici nel caso in cui le dimensioni e le frequenze di lavoro siano paragonabili a quelle dei dispositivi cMUT e le vibrazioni delle strutture siano di tipo *out-of-plane*.

Questo capitolo illustra le misure effettuate in collaborazione con aziende e centri di ricerca europei per valutare nuovi prototipi di trasduttori ultrasonici per applicazioni in acqua o in aria. I risultati raggiunti hanno permesso di studiare il comportamento vibrazionale di tali dispositivi, analizzarne le prestazioni, valutare la resa del processo tecnologico, confrontare i risultati con le simulazioni FEM al fine di migliorarne i modelli.

## 7.1 Caratterizzazione di trasduttori piezoelettrici lineari (collaborazione con *Esaote Pie Medical* - Maastricht, Olanda)

L'azienda *Esaote Pie Medical* è una società controllata dal *Gruppo Esaote* che si occupa della progettazione e produzione di sistemi per ecografia medica in campo veterinario.

I convenzionali trasduttori piezoelettrici per ecografia medica sono costituiti da una struttura multistrato formata da uno o più *matching layer*, la ceramica piezoelettrica (PZT) ed un *backing*: per ottenere i singoli elementi dell'*array* vengono fatti dei tagli nel piano dell'*elevation* (fig. 7.1a) [34]. Gli elementi del trasduttore sono coperti da uno strato protettivo che svolge anche la funzione di lente acustica e vengono connessi elettricamente alle loro estremità tramite due circuiti stampati flessibili uno dei quali è connesso a massa (fig. 7.1b) [35].

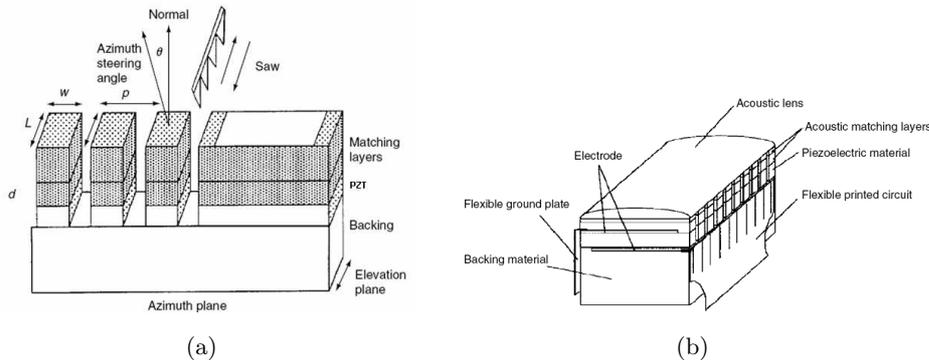


Figura 7.1: Costruzione di una sonda piezoelettrica per ecografia. Struttura interna (a). Visione d'insieme (b).

La ricerca scientifica in ambito aziendale è rivolta da un lato al miglioramento dei processi produttivi dall'altro all'incremento dell'affidabilità e

delle prestazioni dei prodotti. Il presente lavoro si occupa di valutare le prestazioni di due trasduttori piezoelettrici a partire dallo studio del comportamento vibrazionale in aria. I dispositivi presentano due diverse configurazioni di connessione degli elementi: un *array* convenzionale avente le connessioni elettriche alle estremità degli elementi (SC: *Side Connection*) ed un prototipo con le connessioni nella parte centrale (CC: *Center Connection*).

È stato realizzato un particolare set-up per alloggiare il dispositivo sotto il microscopio. Essendo i trasduttori ricoperti da uno strato protettivo opaco, la riflettività della superficie non era sufficiente per l'esecuzione della misura. La riflettività è stata migliorata trattando la gomma di protezione del trasduttore con una vernice acrilica riflettente (fig. 7.2).

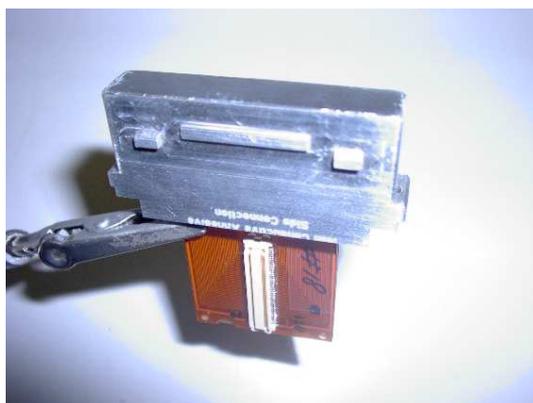


Figura 7.2: Trasduttore *Esaote Pie Medical*.

La misura è stata eseguita applicando un'eccitazione sinusoidale continua alla frequenza 7.2 MHz su un singolo elemento del trasduttore; l'ampiezza è stata scelta in maniera tale da non provocare alcuno stress che potrebbe alterare la riflettività dello strato di vernice. È stata scelta una

griglia di scansione tale da coprire l'intero elemento eccitato comprese le zone dove sono presenti le connessioni elettriche.

I risultati mostrano che la superficie del trasduttore SC durante il normale funzionamento si deforma con ampiezza e fase costante nella direzione dell'*elevation* (fig. 7.3). Nel caso del trasduttore CC le misure evidenziano che la parte centrale dell'elemento eccitato, in corrispondenza delle connessioni elettriche, si muove in controfase rispetto al restante parte (fig. 7.4). Questo risultato mostra chiaramente che il prototipo avente le connessioni elettriche in posizione centrale rispetto all'*elevation* non risulta una conveniente alternativa alla connessione convenzionale di tipo SC.

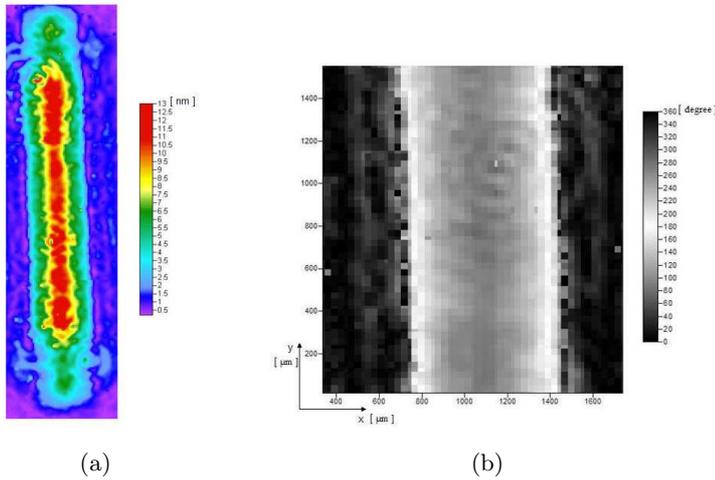


Figura 7.3: Comportamento vibrazionale del trasduttore SC. Ampiezza di spostamento (a). Parte centrale dell'elemento: differenza di fase (b) tra segnale di eccitazione e segnale di spostamento.

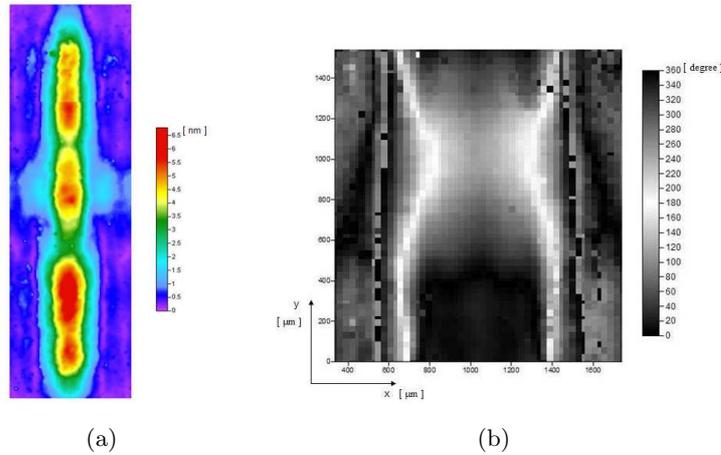


Figura 7.4: Comportamento vibrazionale del trasduttore CC. Ampiezza di spostamento (a). Parte centrale dell'elemento: differenza di fase (b) tra segnale di eccitazione e segnale di spostamento.

## 7.2 Caratterizzazione di trasduttori capacitivi MUMPs (collaborazione con *Istituto de Acustica-CSIC* - Madrid, Spagna)

L'istituto di ricerca CSIC (*Consejo Superior de Investigaciones Científicas*) di Madrid tra le sue attività si sta occupando del progetto di un trasduttore di tipo cMUT per applicazioni NDT in aria. Nell'ambito di questo studio sono stati realizzati presso l'azienda MEMSCAP (MEMSCAP S.A., Bernin, France) cinque diversi prototipi utilizzando il processo MUMPs. La caratterizzazione interferometrica di tali dispositivi è stata effettuata mediante la stazione di misura realizzata in questo lavoro di Tesi.

Il processo MUMPs (*Multi-User MEMS Processes service*) è attualmente il processo standard per la ricerca industriale ed accademica nel campo dei MEMS in quanto esso permette di ridurre notevolmente i costi per la realizzazione di prototipi.

Questo processo è stato sviluppato nei primi anni 90' dal MCNC (Microelectronics Center of North Carolina) supportato dalla agenzia DARPA per fornire un accesso alla realizzazione di dispositivi MEMS in un ambiente multi-utente molto flessibile [35]. Questo significa che ogni cliente può comprare uno spazio (1 cm x 1 cm) sul wafer e presentare un progetto basato sulle regole standard del processo MUMPS (*design rules*) [37]: in questo modo progetti di clienti diversi sono realizzati sullo stesso wafer riducendo notevolmente i costi.

Il processo MUMPS fornisce sette diversi strati per la creazione di strutture sopra un substrato di silicio fortemente drogato. Si utilizza silicio policristallino (polisilicio), realizzato con processo LPCVD, come materiale strutturale per le sue ottime proprietà meccaniche. Il primo strato è costituito da nitruro di silicio LPCVD utilizzato per isolare elettricamente il substrato dal successivo strato di polisilicio (POLY0). Gli strati di polisilicio POLY0, POLY1 e POLY2 sono alternati a strati di biossido di silicio (usato come materiale sacrificale, rimosso se necessario tramite *etching* di acido fluoridrico). Sull'ultimo strato di polisilicio si può depositare uno strato di oro allo scopo di ridurre la resistenza serie complessiva della struttura, fornire un buon contatto elettrico con il polisilicio, semplificare il wire bonding, oppure per avere una superficie riflettente nelle applicazioni ottiche.

I prototipi cMUT caratterizzati in questo lavoro [38] sono *array* costituiti ciascuno da 29 x 2 microcelle capacitive aventi membrane quadrate di lato 150  $\mu\text{m}$ . Le membrane di ciascun prototipo possono avere due lati liberi (*Free*) e due lati vincolati (*Anchored*) alla struttura sottostante (F-A-F-A) oppure avere tutti e quattro i lati vincolati (A-A-A-A). I dispositivi funzionano senza necessità di metallizzazioni essendo il polisilicio strutturale fortemente drogato. Le specifiche dei singoli trasduttori nonché le dimensioni del *gap* e lo spessore della membrana sono riportate di seguito ed illustrate nella figura 7.5.

**Array A8 e B1:** elettrodo inferiore POLY0, elettrodo superiore (membrana) POLY1; *gap*: 1.5  $\mu\text{m}$ ; spessore membrana: 2  $\mu\text{m}$ ; vincoli: F-A-F-A per *array* A8, A-A-A-A per *array* B1.

**Array C7:** elettrodo inferiore Silicio, elettrodo superiore (membrana) POLY1; *gap*: 2  $\mu\text{m}$ ; spessore membrana: 2  $\mu\text{m}$ ; vincoli: F-A-F-A.

**Array D1:** elettrodo inferiore Silicio, elettrodo superiore (membrana) POLY2; *gap*: 2.75  $\mu\text{m}$ ; spessore membrana: 1.5  $\mu\text{m}$ ; vincoli: F-A-F-A.

**Array D3 e D5:** elettrodo inferiore Silicio, elettrodo superiore (membrana) POLY2-Metallo; *gap*: 2.75  $\mu\text{m}$ ; spessore membrana: 1.5  $\mu\text{m}$ ; vincoli: F-A-F-A; elettrodi quadrati di Oro (spessore 0.52  $\mu\text{m}$ ), dimensione laterale 20  $\mu\text{m}$  per l'*array* D3, 75  $\mu\text{m}$  per l'*array* D5.

7. Caratterizzazione di differenti prototipi di trasduttori ultrasonici

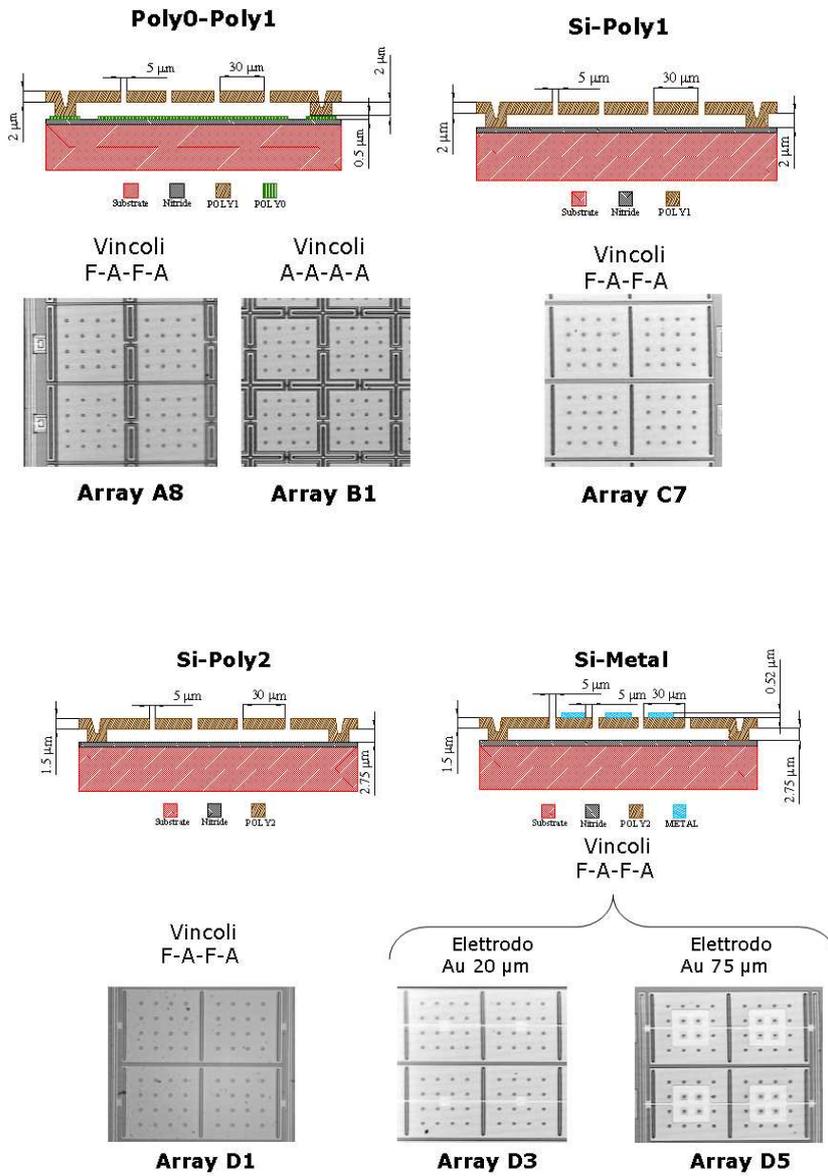


Figura 7.5: Prototipi cMUT realizzati con processo MUMPs.

Lo studio del comportamento vibrazionale dei cinque prototipi ha permesso di valutare l'influenza dei materiali utilizzati per gli elettrodi e la disposizione dei vincoli per la membrana sulle prestazioni del trasduttore in aria [38]. In figura 7.6 sono riportati gli spettri di spostamento per ciascun *array*, eseguiti al centro della membrana.

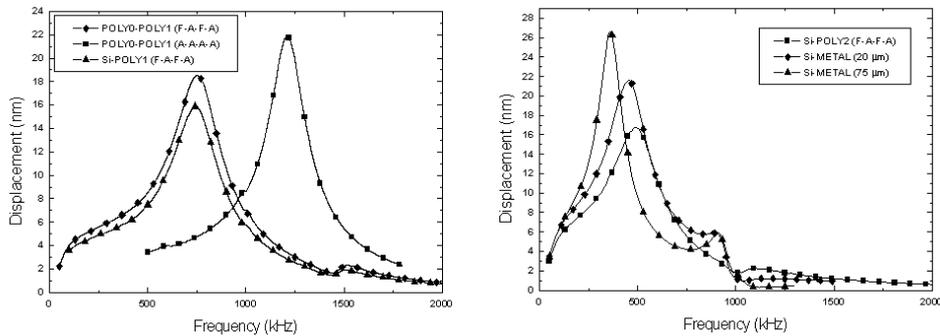


Figura 7.6: Spettri di spostamento dei prototipi cMUT realizzati con processo MUMPs.

Nella figura 7.7 sono presentati i risultati delle mappe di spostamento. Le misure effettuate permettono interessanti considerazioni.

Gli *array* A8 e B1 sono identici: quello che li differenzia è la disposizione dei vincoli infatti in B1 la membrana è vincolata su tutti e quattro i lati (A-A-A-A), in A8 due lati sono liberi e due vincolati (F-A-F-A). L'effetto prodotto da queste differenti configurazioni è visibile negli spettri di spostamento (fig. 7.6): B1 ha una frequenza di risonanza di 1.2 MHz, quasi doppia rispetto a quella del prototipo A8 (750 kHz). Le mappe di spostamento (fig. 7.7) dei due prototipi mostrano che l'ampiezza della deformazione al centro della membrana è maggiore per B1, tuttavia il prototipo A8 possiede una maggiore area con spostamento significativo (area gialla) pertanto

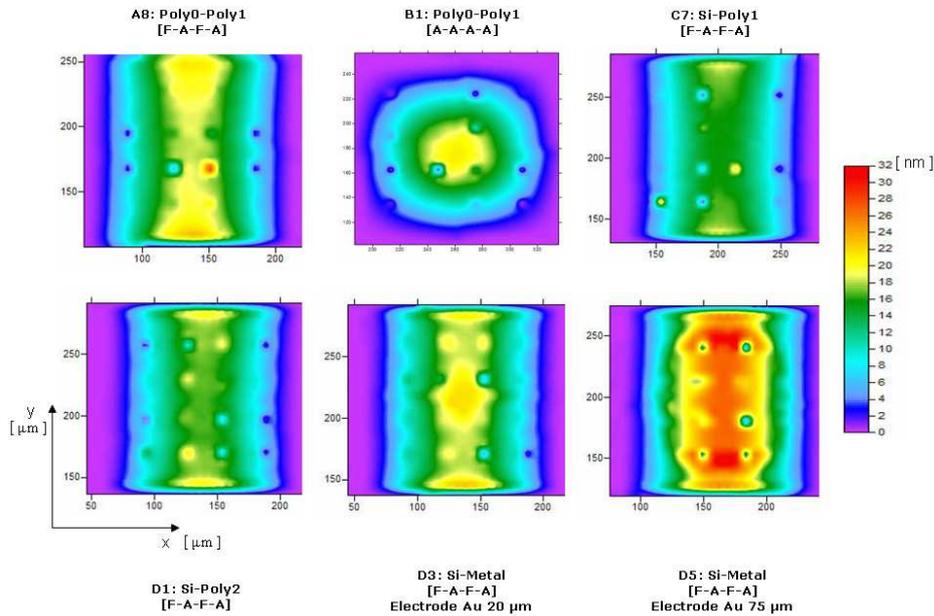


Figura 7.7: Mappe di spostamento dei prototipi cMUT realizzati con processo MUMPs.

risulta maggiore la pressione trasmessa. Questi risultati confermano le previsioni fatte con l'analisi FEM secondo cui la migliore configurazione per la disposizione dei vincoli della membrana è la F-A-F-A.

Per quanto riguarda i prototipi C7 e D1, essi differiscono solamente per le dimensioni del gap e lo spessore della membrana: D1 ha un *gap* maggiore ed una membrana più sottile pertanto la sua frequenza di risonanza è più bassa (500 kHz) rispetto a quella di C7 (750 kHz) ma da migliori risultati in trasmissione come risulta dalla mappa di vibrazione.

I prototipi D3 e D5 sono identici al D1 ma l'elettrodo superiore di POLY2 è stato ricoperto in parte da una metallizzazione di Oro per studiarne l'effetto sulla deformazione della struttura. I risultati mostrano che all'au-

mentare dell'area della metallizzazione (D3: elettrodo di lato  $20 \mu\text{m}$ ; D5: elettrodo di lato  $75 \mu\text{m}$ ) la frequenza di risonanza diminuisce da  $460 \text{ kHz}$  (*array* D3) a  $360 \text{ kHz}$  (*array* D5), inoltre nello spettro di spostamento compare una seconda risonanza indesiderata ( $910 \text{ kHz}$ ) abbastanza vicina alla risonanza principale. L'ampiezza della deformazione al centro della membrana aumenta notevolmente passando da  $22 \text{ nm}$  (*array* D3) a  $32 \text{ nm}$  (*array* D5).

Un'ultima ma importante considerazione riguarda la valutazione del grado di uniformità e quindi della qualità del processo di fabbricazione dell'azienda MEMSCAP. Per ciascun prototipo sono stati eseguiti un certo numero di spettri di spostamento su un campione rappresentativo di membrane (fig. 7.8).

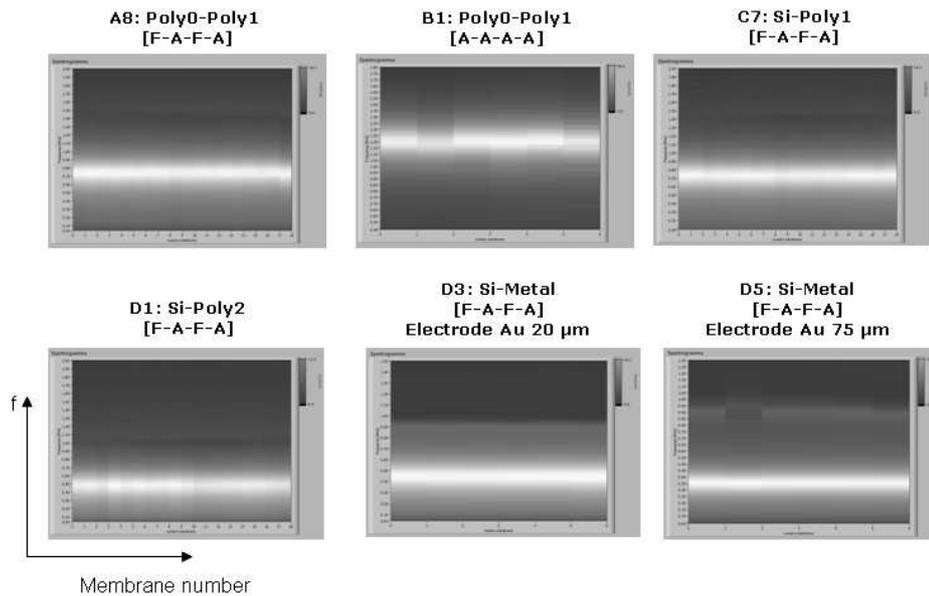


Figura 7.8: Spettri di spostamento effettuati su un numero rappresentativo di membrane per ciascun prototipo.

La massima variazione della frequenza di risonanza intorno al valore medio è pari al 2.6%: questo risultato evidenzia un buon grado di uniformità per il processo tecnologico utilizzato considerando che tale processo generalmente non viene impiegato per la realizzazione di trasduttori cMUT.

Il lavoro di caratterizzazione effettuato sui cinque prototipi [38] ha dimostrato che la migliore configurazione per i vincoli della membrana è quella F-A-F-A, inoltre l'utilizzo di una metallizzazione sull'elettrodo superiore da un lato consente di aumentare la deformazione della membrana e quindi la pressione trasmessa in aria, ma dall'altro diminuisce la frequenza di risonanza del trasduttore e produce modi spuri di vibrazione.

### 7.3 Caratterizzazione di un trasduttore piezoelettrico per *Super Harmonic imaging* (collaborazione con *Thoraxcenter Biomedical Engineering Dep.* - Rotterdam, Olanda)

L'Erasmus Medical Center di Rotterdam è uno dei centri universitari di medicina più avanzati in Europa. Il Thoraxcenter rappresenta una delle sue strutture più importanti: raggruppa al suo interno i dipartimenti di cardiologia, chirurgia cardio-toracica ed ingegneria biomedica. Quest'ultimo si occupa principalmente della ricerca nel campo dell'ecocardiografia con mezzi di contrasto.

L'*imaging* non lineare con mezzi di contrasto (UCA acronimo di *Ultrasound Contrast Agents*) estende notevolmente le potenzialità delle convenzionali tecniche ecografiche [39]. Gli agenti di contrasto sono micro-bolle di dimensioni dell'ordine del micron sospese in una soluzione salina che viene iniettata attraverso una vena periferica. Inizialmente il loro utilizzo dimostrò la possibilità di migliorare la luminosità dell'immagine ecografica limitatamente ai tessuti irrorati in quanto l'impedenza acustica delle micro-bolle, essendo molto diversa da quella del sangue e dei tessuti, si traduceva in un elevato potere riflettente. Tuttavia l'utilizzo delle norma-

li tecniche ecografiche (note come *fundamental imaging*) combinate con i mezzi di contrasto mostrò forti limitazioni nell'analisi di tessuti irrorati da piccoli capillari come ad esempio il miocardio. In tal caso le eco prodotte dai capillari vengono oscurate da quelle generate dalle strutture solide circostanti peggiorando notevolmente il contrasto dell'immagine ecografica.

La prima tecnica che ha permesso di utilizzare i mezzi di contrasto per una corretta visualizzazione dei tessuti irrorati dai capillari è l'*harmonic imaging*. Le micro-bolle utilizzate producono un'eco riflessa che non contiene solo la frequenza fondamentale (trasmessa) ma anche le armoniche di ordine superiore. I tessuti circostanti non presentano tale comportamento: in questo modo appare evidente come sia possibile distinguere facilmente i capillari irrorati dalle micro-bolle nel caso in cui si utilizza una frequenza di trasmissione e si riceve alla frequenza della seconda armonica. In generale il contrasto dell'immagine ecografica risulterebbe migliore utilizzando in ricezione le armoniche di ordine superiore alla seconda (*super harmonics*). Questo è vero soprattutto quando in trasmissione si impiegano frequenze basse (800 kHz) in quanto esse non producono gli effetti non lineari tipici della propagazione nei tessuti. Tuttavia a causa della bassa energia delle *super harmonic* generate dalle bolle, ed a causa della limitata banda dei trasduttori convenzionali, le tecniche di *imaging* non lineare convenzionali utilizzano soltanto la seconda armonica.

Si parla di *super harmonic imaging* quando si trasmette con una frequenza e si riceve alla frequenza delle armoniche superiori alla seconda. Tale tecnica è di particolare interesse in quanto consente un notevole miglioramento del contrasto delle immagini ecografiche quando si utilizzano gli UCA, tuttavia il suo impiego risulta subordinato alla fattibilità di trasduttori adeguati. Nell'ambito di tale studio il Thoraxcenter ha realizzato diversi prototipi [40] dimostrando che la tecnica *super harmonic imaging* può dare ottimi risultati. Ciascun trasduttore è costituito da due *array* operanti a frequenze diverse disposti con gli elementi alternati: i pari lavo-

rano a frequenza più bassa essendo ottimizzati per la trasmissione, i dispari operano a frequenza più elevata e sono ottimizzati per la ricezione.

Nell'ambito della collaborazione tra l'Erasmus Medical Center ed il laboratorio ACULAB, la stazione di misura è stata utilizzata per esaminare il comportamento vibrazionale quando si considera solo l'*array* utilizzato per la ricezione o solo quello per la trasmissione. In particolare risulta interessante misurare il livello di *crosstalk* tra un elemento eccitato ed i primi elementi vicini.

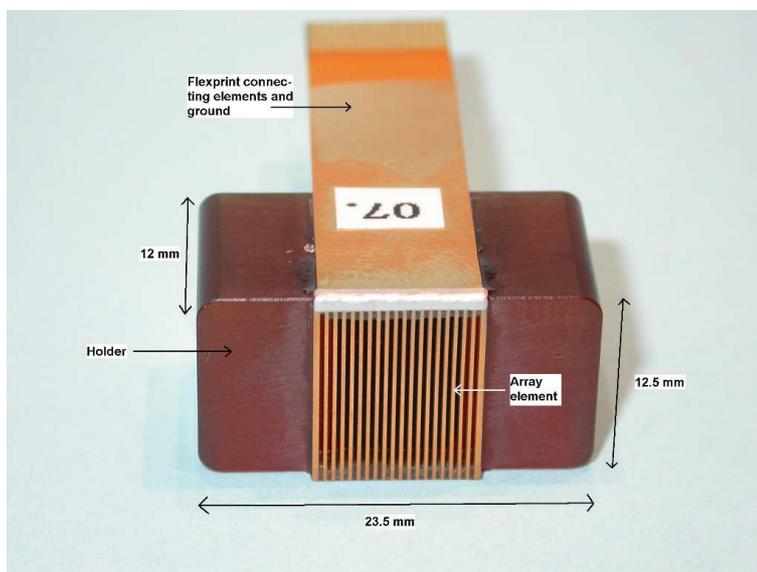


Figura 7.9: Trasduttore *Erasmus MC*.

Il trasduttore caratterizzato (fig. 7.9) è costituito da un materiale piezoelettrico (CTS 3203HD). I singoli elementi hanno un *elevation* di 12.5 mm ed una larghezza di 200  $\mu\text{m}$ , lo spazio fra due elementi contigui è di 300  $\mu\text{m}$  e non è riempito da alcun materiale. Il *backing* è di tipo convenzionale con uno spessore di 12 mm ed una impedenza acustica di 5.3 Mrayl. L'*array*

non possiede alcun tipo di *matching layer* e la sua frequenza di risonanza è pari a 2.3 MHz. La misura è stata effettuata eccitando con una sinusoide continua a frequenza 1.7 MHz ed ampiezza 15 V, un solo elemento del trasduttore in posizione centrale.

I risultati delle misure (fig. 7.10) mostrano che rispetto all'elemento eccitato l'ampiezza massima dello spostamento è a -35 dB per il primo elemento vicino ed a -40 dB per il secondo vicino. Il risultato è abbastanza soddisfacente dal momento che tipicamente nei trasduttori piezoelettrici il livello di *crosstalk* col primo elemento vicino è circa pari a -30 dB.

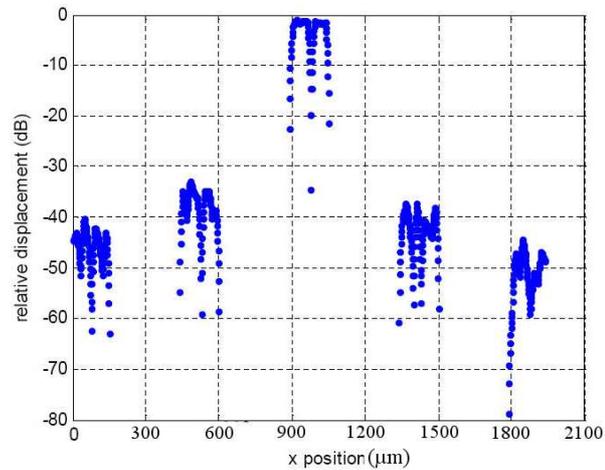


Figura 7.10: Livello di *crosstalk* sull'ampiezza massima dello spostamento. L'elemento eccitato è quello in posizione centrale.



# Conclusioni

La stazione di misura realizzata in questo lavoro di Tesi ed i software sviluppati per il controllo del sistema, hanno permesso di approfondire la conoscenza dei trasduttori cMUT attraverso uno studio del comportamento vibrazionale di tali dispositivi nelle normali condizioni operative. Le procedure di misura sono state appositamente studiate, per una analisi quanto più possibile automatizzata della deformazione dei trasduttori cMUT, delle grandezze che ne caratterizzano il funzionamento, dei difetti strutturali derivanti dal processo di fabbricazione e/o dalla qualità dei materiali impiegati. La caratterizzazione ottica ed interferometrica hanno messo in evidenza i difetti strutturali più frequenti ed i limiti degli attuali modelli di simulazione la cui accuratezza nel descrivere il comportamento dei trasduttori dipende dai valori utilizzati per le proprietà dei materiali. La possibilità di misurare alcune grandezze caratteristiche del dispositivo ha consentito di valutare la resa del processo tecnologico e ricavare alcune proprietà del nitruro di silicio. Questo ha permesso di controllare in maniera più accurata il progetto dei dispositivi e migliorare l'accordo tra i dati sperimentali ed i modelli simulati.

Un'altra possibilità offerta dalla stazione di misura realizzata è stata quella di valutare le prestazioni di prototipi di trasduttori ultrasonici di tipo convenzionale (piezoelettrici) o realizzati con processi di fabbricazione diversi da quelli standard dei cMUT. Queste misure sono state effettuate per conto di aziende e centri di ricerca europei.

## *CONCLUSIONI*

---

I risultati raggiunti in questa Tesi sono stati di importanza strategica per migliorare le prestazioni dei trasduttori cMUT, realizzati presso il laboratorio ACULAB, e la loro affidabilità in vista di una futura commercializzazione.

# Bibliografia

- [1] 2006, <http://www.st.com/stonline/press/news/year2006/ita/c2523fita.htm>
- [2] W. Osten (Editor), *Optical Inspection of Microsystems*, Boca Raton, CRC Press, 2006.
- [3] F. V. Hunt, *Electroacoustics: The Analysis of Transduction, and Its Historical Background*, New York, Acoustical Society of America, 1982.
- [4] W. Kuhl, G. R. Schodder, and F. K. Schodder, "Condenser Transmitters and Microphones with Solid Dielectric for Airborne Ultrasonics", *Acustica*, vol. 4, pp. 520-532, 1954.
- [5] J. H. Cantrell and J. S. Heyman, "Broadband Electrostatic Acoustic Transducer for Ultrasonic Measurements in Liquid", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 50, pp. 31-33, Jan. 1979.
- [6] D. Hohm and G. Hess, "A Subminiature Condenser Microphone with Silicon Nitride Membrane and Silicon Backplate", *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 85, pp. 476-480, Jan. 1989.
- [7] K. Suzuki, K. Higuchi, and H. Tanigawa, "A Silicon Electrostatic Ultrasonic Transducer", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont.*, vol. UFFC-36, pp. 620-627, Nov. 1989.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [8] M. I. Haller and B. T. Khuri-Yakub, “A Surface Micromachined Electrostatic Ultrasonic Air Transducer”, in: *Proc. IEEE Ultrasonic Symposium*, vol. 2, 1994, pp. 1241-1244.
- [9] I. Ladabaum, X. Jin, H.T. Soh, A. Atalar, and B.T. Khuri-Yakub, “Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Transducers”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol. 45, no. 3, pp. 678-690, 1998.
- [10] H. A. Deferrari, F. A. Andrews, “Laser Interferometric Technique for Measuring Small-Order Vibration Displacements”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 39: 979-980, 1966.
- [11] H. A. Deferrari, R. A. Darby and F. A. Andrews, “Vibrational Displacement and Mode-Shape Measurement by a Laser Interferometer”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 42 (5): 982-990, 1967.
- [12] F. J. Eberhardt, F. A. Andrews, “Laser Heterodyne System for Measurement and Analysis of Vibration”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 48: 603-609, 1970.
- [13] A. C. Lewin, A. D. Kersey, D. A. Jackson, “Non-contact Surface Vibration Analysis using a Monomode Fibre Optic Interferometer Incorporating an Open Air Path”, *J. Phys. E*, 18: 604-608, 1985.
- [14] P. Castellini, M. Martarelli, E. P. Tomasini, “Laser Doppler Vibrometry: Development of Advanced Solutions Answering to Technology’s Needs”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20: 1265-1285, 2006.
- [15] *Polytec Hardware Manual*, Microscope Scanning Vibrometer MSV 300, Polytec GmbH, Waldbronn (Germany), 2002.

- [16] “Basic Working Principles of Interferometer Systems and Signal Processing Techniques”, in: *Polytec MSV 300 User Manual*, Polytec GmbH, Waldbronn (Germany), 2000.
- [17] M. Johansmann, G. Siegmund, M. Pineda, “Targeting the Limits of Laser Doppler Vibrometry”, *Technical Paper*, IDEMA Japan, Japan, 2005.
- [18] A. Lewin, G. Siegmund, “The implications of system ”sensitivity” and ”resolution” on an Ultrasonic Detecting LDV ””, in: *Proc. 1st. Int. Conf. of Vibration Measurements by Laser Techniques*, SPIE 2358, Ancona (Italy), 1994, pp. 292-304.
- [19] J. S. Burdess, B. J. Harris, D. Wood, R. J. Pitcher, “A System for Dynamic Characterisation of Microstructures”, *J. Microelectromech. Syst.*, 6: 322-328, 1997.
- [20] D. Eichner, W. von Münch, “A Two-step Electrochemical Etch-stop to Produce Freestanding Bulk-micromachined Structures”, *Sensor. Actuator A*, 60: 103-107, 1997.
- [21] K. L. Turner, P. G. Hartwell, N. C. MacDonald, “Multi-dimensional MEMS Motion Characterization Using Laser Vibrometry”, in: *The 10th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '99)*, Sendai (Japan), 1999, Digest of Technical Papers, pp. 1144-1147.
- [22] P. Krehl, S. Engemann, C. Rembe, E. P. Hofer, “High-speed Visualization, a Powerful Diagnostic Tool for Microactuators - Retrospect and Prospect”, *Microsyst. Technol.*, 5: 113-132, 1999.
- [23] E. M. Lawrence, K. E. Speller, “MEMS Characterization Using Laser Doppler Vibrometry. Reliability, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS II”, in: *SPIE Proceedings*, Vol. 4980, 2002.

- [24] E. Cianci, F. Pirola, V. Foglietti, “Analysis of Stress and Composition of Silicon Nitride Thin Films Deposited by ECR-PECVD for Microfabrication Processes”, *J. Vac. Sci. Technol.*, B23(1), 2005, 168.
- [25] K.-C. Lin, S.-C. Lee, “The Structural and Optical Properties of a  $\text{SiN}_x\text{:H}$  Prepared by Plasma-Enhanced Chemical-Vapor Deposition”, *J. Appl. Phys.*, 72 (11), 1992, 5474.
- [26] G.N. Parsons, J.H. Souk, J. Batey, “Low Hydrogen Content Stoichiometric Silicon Nitride Films Deposited by Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition”, *J. Appl. Phys.*, 70, 1991, 1553.
- [27] W.A.P. Claasen, W.G.Y.N. Valkenburg, M.F.C. Willemsen, W.M. van de Wijgert, “Influence of Deposition Temperature, Gas Pressure, Gas Phase Composition, and RF Frequency on Composition and Mechanical Stress of Plasma Silicon Nitride Layers”, *J. Electrochem. Soc.*, 132(4), 1985, 893.
- [28] E. Cianci, V. Foglietti, A. Minotti, G. Caliano, M. Pappalardo, “1D Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer Arrays for Echographic Probes”, *Microelectron. Eng.*, 502, 2004, 73-74.
- [29] E. Cianci, A. Schina, A. Minotti, S. Quaresima, V. Foglietti, “Dual Frequency PECVD Silicon Nitride for Fabrication of CMUTs’ Membranes”, *Sensors and Actuators*, 127, 2006, 80-87.
- [30] A. Savoia, G. Caliano, R. Carotenuto, C. Longo, P. Gatta, A. Caronti, E. Cianci, V. Foglietti, and M. Pappalardo, “Enhanced Echographic Images Obtained Improving the Membrane Structural Layer of the cMUT Probe”, in: *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Rotterdam, 2005.
- [31] G.S. Selwyn et al., “In-situ Particulate Contamination Studies in Process Plasmas”, in: *SPIE Conference Proc.*, Oct. 1989, 1-12.

- [32] Anand Gupta, “Reducing Particulate Contamination During Semiconductor Device Processing”, *United States Patent* 5,328,555, Jul. 1994.
- [33] B. Weigang, G. W. Moore, J. Gessert, W. H. Phillips, M. Schafer, “The Methods and Effects of Transducer Degradation on Image Quality and the Clinical Efficacy of Diagnostic Sonography”, in: *Transducer Analysis and Repair Laboratory*, Sonora Medical Systems, Longmont (USA).
- [34] Thomas L. Szabo, *Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out*, Burlington, Elsevier Academic Press, 2004.
- [35] S. Saitoh, T. Takeuchi, T. Kobayashi, K. Harada, S. Shimanuki, and Y. Yamashita, “A 3.7 MHz Phased Array Probe Using  $0.91\text{Pb}(\text{Zn}_{1=3}\text{Nb}_{2=3})\text{O}_3\text{-}0.09\text{PbTiO}_3$  Single Crystal”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, vol. 46, no. 2, 1999.
- [36] K. W. Markus and M. Walters, “MEMS Commercialization Activities at MCNC”, in: *WESCON/’95. Conference record*, San Francisco (USA), 1995.
- [37] J. Carter, A. Cowen, B. Hardy, R. Mahadevan, M. Stonefield and S. Wilcenski, “Poly MUMPs Design Handbook”, Revision 11.0, MEMSCAP Inc., 2005.
- [38] A. Octavio, P. Gatta, M. Dominguez, C. J. Martin, Y. Gomez-Ullate, O. Martinez, L. Gomez-Ullate and F. Montero de Espinosa, “Design and Characterization of Air Coupled Ultrasonic Transducers Based on MUMPS”, in: *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Vancouver (CANADA), 2006.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [39] P. Frinking, A. Bouakaz, J. Kirkhorn, F. Ten Cate, and N. de Jong, “Ultrasound Contrast Imaging: Current and New Potential Methods”, *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol. 25, pp. 965-975, 2000.
- [40] A. Bouakaz, S. Frigstad, F. Ten Cate, and N. de Jong, “Super Harmonic Imaging: a New Imaging Technique for Improved Contrast Detection”, *Ultrasound in Med. & Biol.*, Vol. 28, No. 1, pp. 59-68, 2002.