

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO



***DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE***

*Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale  
Curriculum di Ingegneria Elettronica - XXXI Ciclo*

## **FEM MODELLING AND CHARACTERIZATION OF ULTRASONIC FLEXTENSIONAL TRANSDUCERS**

### **Abstract**

**Tutor**

*Prof. Nicola A. Lamberti*

**Candidato**

*Monica La Mura*

**Comitato Scientifico**

*Prof. Alessandro S. Savoia*

*Prof. Giosuè Caliano*

**Coordinatore del Corso di Dottorato**

*Prof. Ernesto Reverchon*

Questo lavoro descrive la modellazione agli elementi finiti e la caratterizzazione di array di trasduttori ultrasonici flessurali. I trasduttori acustici a flessione possono essere dispositivi piezoelettrici o dispositivi capacitivi, basati sul principio di attrazione elettrostatica tra un elettrodo in movimento e un substrato. A causa della miniaturizzazione limitata consentita dal processo di fabbricazione delle piezoceramiche, i dispositivi piezoelettrici a flessione basati su ceramiche bulk sono in grado di lavorare nel range di ultrasuoni a bassa frequenza. I dispositivi a flessione capacitivi, invece, possono essere realizzati sfruttando le tecniche di microlavorazione del silicio, ed essere quindi progettati per lavorare a frequenze più alte.

I CMUT (Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers) sono dispositivi MEMS costituiti da membrane metallizzate di dimensioni micrometriche, che vibrano con un movimento a flessione in risposta ad un segnale elettrico durante la trasmissione, e, viceversa, generano un segnale di tensione quando azionate da un segnale acustico incidente. Grazie alla loro bassa impedenza acustica, gli array di CMUT hanno dato risultati eccellenti nelle applicazioni di imaging ecografico.

La frontiera più spinta dell'imaging a ultrasuoni è l'imaging volumetrico in tempo reale. Le immagini 3D venivano inizialmente ottenute con array lineari, ruotati meccanicamente sul piano di elevazione. Strutture più complesse come gli array 2D, però, consentono la deflessione elettronica del fascio e la messa a fuoco dinamica sia nel piano azimutale che in quello di elevazione, ottenendo così prestazioni migliori. Però, al fine di aumentare il frame rate, parte delle operazioni di trasmissione e ricezione e la logica di controllo per il beamforming devono essere eseguite da una circuiteria alloggiata all'interno sonda, quanto più vicino possibile al dispositivo trasduttore. Pertanto, gli array 2D devono essere di piccole dimensioni e facilmente interfacciabili con l'elettronica di front-end. Tuttavia, per avere buone caratteristiche di radiazione, gli array 2D devono anche avere aperture ampie e con un piccolo passo tra gli elementi, quindi un gran numero di elementi. Ciò comporta l'esistenza di molti canali da collegare e controllare individualmente, con evidenti problematiche di connessione. Per superare questi problemi si sta prestando molta attenzione alla progettazione di array sparsi, che cercano di ottenere prestazioni comparabili con un numero di elementi inferiore.

Per la progettazione di dispositivi CMUT ottimizzati, è necessario ricorrere ad una modellazione accurata: la propagazione dell'onda acustica prodotta da una sorgente composta da più membrane vibranti che irradiano in un mezzo fluido non può essere descritta da modelli analitici, dunque i dispositivi CMUT devono essere simulati con modelli agli elementi finiti (FEM). In questo lavoro è stato utilizzato un modello semplificato 2D assialsimmetrico di dispositivi CMUT multicella ad ampia apertura, per sviluppare uno strumento di supporto al processo di progettazione. Il modello è stato utilizzato per studiare l'effetto della variazione dei parametri di progetto sulle prestazioni statiche e dinamiche degli array CMUT composti da celle circolari. La tensione di collasso, il profilo di deflessione della membrana e la capacità statica dei dispositivi CMUT *Reverse-Fabricated* (RF-CMUT) sono stati calcolati variando il raggio e lo spessore della membrana e l'altezza della cavità. Poiché i dispositivi realizzati con il processo di fabbricazione inversa sono costruiti dall'alto verso il basso, la base di nitrato di silicio può essere resa molto sottile e i dispositivi possono essere supportati da backing acustici arbitrari. È stato valutato l'effetto del materiale di backing sul comportamento pulse-echo dei dispositivi CMUT in immersione, osservando la riduzione del fenomeno di riverbero in risposta all'accoppiamento dell'impedenza acustica del materiale di backing con l'impedenza acustica del mezzo di propagazione.

Per studiare le performance di un array CMUT sparso, è necessario ricorrere ad un modello FEM 3D, dal momento che non c'è simmetria assiale in questo tipo di layout. Per questo motivo, un modello completo di una cella di un reverse-CMUT è stato implementato, testato e sperimentalmente validato. A causa dei tempi di simulazione molto lunghi richiesti dall'analisi agli elementi finiti di un elemento trasduttore di dimensioni finite, uno studio sull'ottimizzazione della mesh è stato condotto su una struttura più semplice, cioè un trasduttore infinito. I risultati di questo processo di ottimizzazione sono stati usati per meshare un modello importato da CAD dell'elemento dell'array sparso.

L'array studiato è parte di un modulo multi-chip (MCM) che comprende un array CMUT con layout basato su una spirale di Fermat a densità rastremata e un circuito di front-end analogico (AFE) implementato su ASIC, interfacciato con l'array trasduttore tramite wafer-bonding con uno strato di Benzocyclobutene (BCB). L'array, avente un'apertura di 10 mm, è progettato per operare a banda larga intorno ai 7 MHz in immersione, ed è formato da 256 elementi di dimensione  $1.0\lambda$  costituiti da 19 celle circolari disposte esagonalmente. Il modello proposto è stato usato per fare un'analisi armonica in ANSYS, al fine di calcolare il fattore di elemento che modula il campo di pressione radiato dall'array. Lo studio della direttività dell'elemento dell'array è importante per valutare le capacità di deflessione del fascio del dispositivo. Il profilo di radiazione è stato calcolato variando le condizioni al contorno meccaniche applicate all'elemento dell'array, per esaminare l'effetto di un isolamento acustico degli elementi, ottenibile realizzando degli scavi nello strato di BCB o sia

nel BCB sia nel nitrato strutturale. I risultati ottenuti per il dispositivo inserito in una struttura infinitamente estesa sono in discreto accordo con le misure effettuate su un prototipo della testa della sonda, sebbene esistano alcune differenze nel livello del lobo principale e dei lobi secondari probabilmente dovute alla non corretta compensazione della direttività dell'idrofona applicata ai valori misurati.

Il modello FEM del CMUT multicella ad ampia apertura è stato poi usato come base per modellare un array a flessione di membrane circolari attuate da dischi piezoelettrici, alloggiati all'interno di una cavità ed incollati sul retro di una piastra metallica. L'array trasduttore è stato progettato per operare a banda larga in ricezione in condizioni di accoppiamento al cemento, al fine di effettuare efficacemente misure di emissione acustica per il monitoraggio di costruzioni cementizie. Il progetto dell'array a flessione piezoelettrico si è basato sul calcolo della funzione di trasferimento in ricezione del dispositivo, ottenuta in condizioni di accoppiamento acustico al cemento, variando i parametri geometrici della piastra elastica, del layer strutturale, dei dischi piezoelettrici e del backing. Il dispositivo risultante ha una banda a -6 dB di 200 kHz centrata intorno alla frequenza di 112 kHz, pertanto è adatto per tecniche di emissione acustica applicate a strutture in cemento.