

POLITECNICO DI MILANO

School of Industrial and Information Engineering  
Master's Degree in Materials Engineering and  
Nanotechnology



**MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DI  
MICROSPEAKERS PIEZOELETTRICI PER  
APPLICAZIONI IN-EAR**

Relatori: Prof. Alberto CORIGLIANO  
Ph.D. Gianluca MASSIMINO

Tesi di Laurea Magistrale di:

Riccardo CANAVESE, Matr. 917869

Anno accademico 2019/2020



# RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il Professor Alberto Corigliano e il Dottor Gianluca Massimino, relatori di questo lavoro di tesi magistrale, per la disponibilità dimostratami durante tutto il periodo del lavoro di tesi.

Ringrazio la società STMicroelectronics, in particolare la Dottoressa Silvia Adorno e l'Ingegnere Fabrizio Cerini, per i dati condivisi e i consigli durante il progetto.

Infine, un ringraziamento alla mia famiglia e agli amici che mi hanno accompagnato durante il percorso universitario e che mi accompagnano sempre.



# SOMMARIO

I MEMS sono una tecnologia a base di Silicio sviluppata negli ultimi decenni che è stata capace, in breve tempo, di rivoluzionare sia il mondo industriale sia quello dei beni di largo consumo. La presenza di questi dispositivi, infatti, risulta essere ormai inevitabile nella quasi totalità delle applicazioni tecnologiche. Questo lavoro di tesi è stato condotto a seguito di una collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano e la società STMicroelectronics, leader nella produzione di componenti elettronici a semiconduttore. Nell'elaborato si prende come riferimento il mondo degli attuatori acustici per applicazioni in-ear, anche in questo ambito, infatti, la ricerca di dispositivi miniaturizzati con una buona efficienza energetica e con alte prestazioni è in costante aumento. Utilizzando il software COMSOL Multiphysics sono stati modellati alcuni micro-attuatori presentati in letteratura. La metodologia appresa nella modellazione di microspeakers è stata utilizzata per proporre nuove configurazioni di dispositivi ad attuazione piezoelettrica, ideate prendendo ispirazione dalla tecnica orientale dei kirigami. I risultati ottenuti mostrano i modi di risonanza e le risposte in frequenza dei dispositivi studiati. Sono stati ottenuti alcuni dispositivi dell'estensione di  $4 \times 4$  [mm<sup>2</sup>] con più modi di vibrazione utili alla generazione di pressione acustica nella banda dell'udibile, situati sia alle alte che alle basse frequenze. Le curve di risposta in frequenza risultano essere a livelli inferiori rispetto ai dispositivi di riferimento. Fra gli sviluppi futuri dei dispositivi proposti si prevede la modifica della geometria dello strato di materiale piezoelettrico in modo da ottimizzare l'efficienza del metodo di attuazione.

# ABSTRACT

MEMS are a Silicon based technology which has been developed in the last decades and that has been able, in a very short time, to revolutionize both the industrial and the fast-moving consumer goods worlds. The presence of those devices is now almost essential in most of the technological applications. This master's thesis work was conducted as result of a collaboration between the Department of Civil and Environmental Engineering of Politecnico di Milano and STMicroelectronics, leader in the production of semiconductor electronic components. In the present work the world of acoustic actuators for in-ear applications is considered; in this field of applications the interest in studying miniaturized devices with good power efficiency and great performances is increasing. Models of micro-actuators studied in the state of the art were built using the software: COMSOL Multiphysics. Once the microspeakers modelling methodology was clarified, it was applied for the study of new configurations of piezoelectric devices, designed taking inspiration from the oriental technique of kirigami. The obtained results show the resonance modes and the frequency response of the studied devices. Microspeakers of  $4 \times 4$  [mm<sup>2</sup>] with several vibration modes, both at high and low frequency, able to generate acoustic pressure in the audible band were studied. The frequency response curves turn out to be on lower levels compared to the ones of the devices taken as a reference. Future developments may foresee the patterning of the piezoelectric material's geometry and thickness to optimize the efficiency of the actuation method.

# INDICE DEI CONTENUTI

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
1.1 Obiettivo dell'elaborato .....	1
1.2 Organizzazione dell'elaborato .....	2
<b>MEMS: COSA SONO E COME SI PRODUCONO .....</b>	<b>4</b>
2.1 Cosa sono i MEMS? .....	4
2.2 Produzione dei MEMS.....	5
2.2.1 Deposizione di film sottili .....	9
2.2.1.1 Deposizione Sol-Gel .....	9
2.2.1.2 Sputtering .....	10
2.2.2 Processi produttivi di microspeakers presenti nello stato dell'arte .....	12
2.2.2.1 Dispositivi ideati presso l'Istituto Fraunhofer ISIT .....	12
2.2.2.2 Dispositivi ideati presso l'Università di Taiwan.....	13
<b>MICROSPEAKERS: STATO DELL'ARTE.....</b>	<b>15</b>
3.1 Microspeakers .....	15
3.1.1 Risposta in frequenza.....	16
3.1.2 Distorsione armonica .....	17
3.2 Tipologie di microspeakers .....	19
3.2.1 Balanced armature microspeakers .....	19
3.2.2 USound piezo microspeakers .....	22
3.2.3 Piezo microspeakers ideati presso l'Istituto Fraunhofer ISIT .....	25
3.2.3.1 Prima configurazione: Tweeter + Woofer .....	27
3.2.3.2 Seconda configurazione: Solo Tweeter.....	29
3.2.4 Piezo Microspeaker ideato presso la National Tsing Hua University di Taiwan.....	31
3.2.4.1 Prima configurazione: molle a curva singola.....	33
3.2.4.2 Seconda configurazione: molle a curva doppia .....	36
3.2.4.3 Terza configurazione: molle a curva singola con elettrodo centrale.....	39

3.2.4.4	Quarta configurazione: array di cinque microspeakers.....	42
3.2.5	Piezo microspeaker ideato dalla compagnia xMEMS .....	45
3.3	Kirigami: esempio dal mondo MEMS .....	46
<b>PIEZOELETTTRICITÀ E ACUSTICA.....</b>		<b>49</b>
4.1	Piezolettricità.....	49
4.1.1	Descrizione matematica delle proprietà piezoelettriche .....	51
4.2	Acustica.....	55
4.2.1	Descrizione matematica dell'acustica classica .....	56
4.2.2	Acustica termoviscosa .....	58
4.3	Accoppiamenti multi-fisici .....	62
4.3.1	Interazione acustico-strutturale.....	62
4.3.2	Interazione termoacustico-strutturale .....	62
4.3.3	Interazione termoacustica-acustica .....	63
<b>MODELLI AD ELEMENTI FINITI .....</b>		<b>65</b>
5.1	Introduzione .....	65
5.2	Tweeter proposto dall'Istituto Fraunhofer ISIT.....	67
5.2.1	Mesh .....	71
5.2.1.1	Dominio solido.....	71
5.2.1.2	Dominio termo-viscoso.....	72
5.2.1.3	Dominio fluido.....	72
5.2.2	Risultati delle simulazioni .....	74
5.2.2.1	Risposta in frequenza dell'intensità acustica .....	74
5.3	Tweeter Fraunhofer ISIT con stratigrafia modificata .....	75
5.3.1	Risultati delle simulazioni .....	76
5.3.1.1	Configurazione di riferimento.....	76
5.3.1.2	Analisi dei modi di vibrazione .....	77
5.3.1.3	Risposta in frequenza dell'intensità acustica .....	77
5.4	Modello proposto dalla National Tsing Hua University di Taiwan.....	79
5.4.1	Mesh .....	80

5.4.2	Risultati delle analisi.....	81
5.4.2.1	Configurazione di riferimento.....	81
5.4.2.2	Modi di vibrazione e SPL .....	82
5.4.2.2.1	Stratigrafia proposta dall'Università di Taiwan .....	82
5.4.2.2.2	Stratigrafia proposta dall'azienda STMicroelectronics.....	88
5.5	Dispositivo “Quadrifoglio” .....	91
5.5.1	Modellazione e Mesh.....	91
5.5.2	Risultati delle analisi.....	94
5.5.2.1	Configurazione di riferimento.....	94
5.5.2.2	Analisi dei modi di vibrazione .....	95
5.5.2.3	Risposta in frequenza dell'intensità acustica .....	96
5.6	Dispositivo “Quadrifoglio” con intagli .....	99
5.6.1	Risultati delle analisi.....	100
5.6.1.1	Configurazione di riferimento.....	100
5.6.1.2	Analisi dei modi di vibrazione .....	101
5.6.1.3	Risposta in frequenza dell'intensità acustica .....	102
5.7	Dispositivo “Quadrifoglio” con intagli e molle piegate.....	104
5.7.1	Risultati delle analisi.....	105
5.7.1.1	Configurazione di riferimento.....	105
5.7.1.2	Analisi dei modi di vibrazione .....	106
5.7.1.3	Risposta in frequenza dell'intensità acustica .....	107
	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>109</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>114</b>

## INDICE DELLE FIGURE

<b>Figura 2.1:</b> Schematizzazione del processo fotolitografico [2].	6
<b>Figura 2.2:</b> Schematizzazione dei passaggi del processo ThELMA [5].	8
<b>Figura 2.3:</b> Tecnica sol-gel di deposizione di film sottili [7].	9
<b>Figura 2.4:</b> Schematizzazione del processo di sputtering RF [7].	11
<b>Figura 2.5:</b> Deposizione di tutti gli strati funzionali (a); modellazione del PZT e degli elettrodi (b); modellazione dello strato di Silicio policristallino (c); DRIE sul retro del dispositivo per il rilascio della struttura (d) [8].	12
<b>Figura 2.6:</b> Processo di deposizione utilizzato dai ricercatori dell'Università di Taiwan [9].	13
<b>Figura 3.1:</b> Esempio di curva della risposta in frequenza. [12]	17
<b>Figura 3.2:</b> esempio di curva che riporta i livelli di THD [17].	18
<b>Figura 3.3:</b> Esempio di dispositivo balanced armature. [27]	19
<b>Figura 3.4:</b> Risposta in frequenza del dispositivo: "Receiver 26A005/8"; [12].	20
<b>Figura 3.5:</b> Distorsione armonica del dispositivo: "Receiver 26A005/8" [12].	21
<b>Figura 3.6:</b> Wafer di Silicio utilizzato per la produzione di microspeakers da USound. [13].	22
<b>Figura 3.7:</b> Dispositivo USound completo [13]	23
<b>Figura 3.8:</b> Risposta in frequenza del dispositivo "Achelous" [13]	23
<b>Figura 3.9:</b> Distorsione armonica totale del dispositivo "Achelous" [13].	24
<b>Figura 3.10:</b> Stratigrafia dei dispositivi proposti dall'Istituto di Fraunhofer [8].	25
<b>Figura 3.11:</b> Campo di velocità dell'aria all'interno di fenditure sottili. [8]	26
<b>Figura 3.12:</b> SPL di un dispositivo tweeter in funzione della larghezza delle fenditure. [8]	26
<b>Figura 3.13:</b> Configurazione del dispositivo "Tweeter + Woofer" dell'Istituto di Fraunhofer. [8]	27
<b>Figura 3.14:</b> Risposta in frequenza del dispositivo "Tweeter + Woofer" [8].	28
<b>Figura 3.15:</b> Configurazione del dispositivo "Tweeter" dell'Istituto di Fraunhofer.. [15].	29
<b>Figura 3.16:</b> Risposta in frequenza e distorsione armonica del dispositivo "Tweeter" [15].	30
<b>Figura 3.17:</b> Stratigrafia del microspeaker ideato presso la National Tsing Hua University di Taiwan. [9].	31
<b>Figura 3.18:</b> Rappresentazione schematica del foro acustico posizionato in fondo alla cavità acustica sul retro dei dispositivi ideati presso la National Tsing Hua University di Taiwan. [9].	32
<b>Figura 3.19:</b> Microspeaker con molle a curva singola [16]	33
<b>Figura 3.20:</b> Risposta in frequenza del microspeaker con molle curve [16]	34

<b>Figura 3.21:</b> Distorsione armonica del dispositivo studiato nel paragrafo. [16] .....	35
<b>Figura 3.22:</b> Microspeaker con molle a curva doppia [17] .....	36
<b>Figura 3.23:</b> Risposta in frequenza del dispositivo con molle a spirale ed elettrodi differenziati.[17] .....	37
<b>Figura 3.24:</b> Distorsione armonica del dispositivo con molle a spirale ed elettrodi differenziati.[17] .....	38
<b>Figura 3.25:</b> Configurazione di dispositivo che prevede molle a curva singola e presenza di un elettrodo centrale. [18].....	39
<b>Figura 3.26:</b> Modi di vibrazione del dispositivo [18].....	40
<b>Figura 3.27:</b> Risposta in frequenza del dispositivo [18].....	41
<b>Figura 3.28:</b> Array di dispositivi e singolo elemento che compone l'array. [19].....	42
<b>Figura 3.29:</b> Curva di risposta in frequenza per il singolo microspeaker [19].....	43
<b>Figura 3.30:</b> Curva di risposta in frequenza dell'intero dispositivo [19] .....	44
<b>Figura 3.31:</b> Dispositivo "Montara" ideato dalla compagnia xMEMS. [20] .....	45
<b>Figura 3.32:</b> Esempi di microstrutture, ispirate alla tecnica dei kirigami [21].....	46
<b>Figura 3.33:</b> kirigami in carta, modello a computer e dispositivo realizzato [22]....	47
<b>Figura 4.1:</b> Schema riassuntivo di effetto piezoelettrico diretto e inverso. [29] .....	50
<b>Figura 4.2:</b> Struttura cristallina del PZT. [30] .....	51
<b>Figura 4.3:</b> Reticolo cristallino del PZT: non polarizzato, polarizzato, effetto 31 o 33, effetto 15. [28] .....	54
<b>Figura 4.4:</b> Generazione di un'onda acustica con formazione di zone di compressione e zone di rarefazione dell'aria. [25] .....	55
<b>Figura 5.1:</b> Contorni a cui è assegnato il vincolo fisso.....	67
<b>Figura 5.2:</b> Domini termo-acustici, strato di silicio e strato di PZT. ....	68
<b>Figura 5.3:</b> Contorni di accoppiamento termoacustico-strutturale .....	68
<b>Figura 5.4:</b> Domini d'aria circostanti la struttura del microspeaker.....	69
<b>Figura 5.5:</b> Dominio termo-viscoso che circonda la fenditura .....	70
<b>Figura 5.6:</b> Accoppiamento acustico-strutturale e accoppiamento termoacustico-acustico. ....	70
<b>Figura 5.7:</b> Mesh superficiale dei domini solidi .....	71
<b>Figura 5.8:</b> Dettaglio della mesh costruita sul cilindro che circonda la fenditura	72
<b>Figura 5.10:</b> Dettaglio della mesh costruita nei domini fluidi più esterni. ....	73
<b>Figura 5.9:</b> Mesh del dominio fluido con strato limite in prossimità dei PML. ....	73
<b>Figura 5.11:</b> Risposta in frequenza del livello di pressione sonora generato dal dispositivo "Tweeter" ideato presso l'Istituto Fraunhofer. ....	74
<b>Figura 5.12:</b> Dettaglio della stratigrafia utilizzata nel dispositivo. ....	75
<b>Figura 5.13:</b> Configurazione di riferimento per la struttura "Tweeter" con stratigrafia modificata rispetto al modello dell'Istituto Fraunhofer. ....	76
<b>Figura 5.14:</b> Deformazione relativa al modo di risonanza del dispositivo posto a 10.2 [kHz]. ....	77
<b>Figura 5.15:</b> SPL generato dal dispositivo "Tweeter" ideato presso l'Istituto Fraunhofer con stratigrafia modificata .....	78

<b>Figura 5.16:</b> Diaframma del dispositivo ideato dai ricercatori dell'Università di Taiwan modellato in ambiente COMSOL Multiphysics. ....	79
<b>Figura 5.17:</b> Modellazione completa del dispositivo con sezione dei domini d'aria superiori. ....	80
<b>Figura 5.18:</b> Discretizzazione dei domini del modello.....	81
<b>Figura 5.19:</b> Pre-deflessione del dispositivo dovuta agli sforzi residui.....	81
<b>Figura 5.21:</b> Attuazione diretta e attuazione inversa .....	82
<b>Figura 5.21:</b> Risposta in frequenza del dispositivo. ....	83
<b>Figura 5.22:</b> Ampiezze e configurazione di vibrazione del dispositivo. ....	84
<b>Figura 5.23:</b> Risposta in frequenza del dispositivo attuato esclusivamente tramite gli elettrodi posti sulle molle.....	85
<b>Figura 5.24:</b> Ampiezze e configurazioni di vibrazione del dispositivo.....	86
<b>Figura 5.25:</b> Confronto tra le curve di risposta in frequenza del dispositivo attuato nelle due diverse modalità. ....	87
<b>Figura 5.26:</b> Attuazione diretta e attuazione inversa degli elettrodi.....	88
<b>Figura 5.27:</b> Modi di risonanza della membrana.....	89
<b>Figura 5.28:</b> Curva di SPL generata dal dispositivo a distanza di 1 [cm].. ....	89
<b>Figura 5.29:</b> Confronto tra le curve di emissione acustica a 10 [cm] e ad 1 [cm]....	90
<b>Figura 5.30:</b> Curva di SPL generata dal dispositivo a distanza di 10 [cm]. ....	90
<b>Figura 5.31:</b> Presentazione della geometria ideata: "Quadrifoglio" .....	92
<b>Figura 5.32:</b> Discretizzazione in elementi finiti del dispositivo "Quadrifoglio".....	93
<b>Figura 5.33:</b> Discretizzazione in elementi finiti del diaframma del dispositivo "Quadrifoglio". ....	93
<b>Figura 5.34:</b> Configurazione di riferimento del dispositivo "Quadrifoglio" .....	94
<b>Figura 5.35:</b> Modi di vibrazione del dispositivo "Quadrifoglio".. ....	95
<b>Figura 5.36:</b> Risposta in frequenza del dispositivo "Quadrifoglio" misurata a 10 [cm] di distanza e considerando la cavità acustica aperta e chiusa. ....	96
<b>Figura 5.37:</b> Confronto tra le risposte in frequenza, a parità di condizioni di test, per il "Tweeter" dell'Istituto Fraunhofer e il modello ideato: "Quadrifoglio" considerando la cavità acustica chiusa.....	97
<b>Figura 5.38:</b> Confronto tra le risposte in frequenza, a parità di condizioni di test, per il "Tweeter" dell'Istituto Fraunhofer e il modello ideato: "Quadrifoglio" considerando la cavità acustica aperta. ....	98
<b>Figura 5.39:</b> Geometria di un quarto di dispositivo con intagli evidenziati. ....	99
<b>Figura 5.40:</b> Configurazione di riferimento del dispositivo "Quadrifoglio con intagli". ....	100
<b>Figura 5.41:</b> Modi di vibrazione del dispositivo. ....	101
<b>Figura 5.42:</b> Curva di risposta in frequenza del dispositivo.....	102
<b>Figura 5.43:</b> Confronto di prestazioni tra i dispositivi presi in considerazione, mantenendo la cavità acustica aperta.....	103
<b>Figura 5.44:</b> Confronto di prestazioni tra i dispositivi presi in considerazione, mantenendo la cavità acustica chiusa. ....	103

<b>Figura 5.45:</b> Configurazione “Quadrifoglio con intagli e molle piegate” .....	104
<b>Figura 5.46:</b> Configurazione di riferimento per “Quadrifoglio con intagli e molle piegate” .....	105
<b>Figura 5.47:</b> Modi di vibrazione del diaframma.....	106
<b>Figura 5.48:</b> Risposta in frequenza del dispositivo: “Quadrifoglio con intagli e molle piegate” .....	107



## INTRODUZIONE

### 1.1 Obiettivo dell'elaborato:

Lo sviluppo e lo studio di una struttura multistrato complessa, quale può essere considerata quella di un microspeaker, è un problema che prevede un approccio multidisciplinare che integri conoscenze provenienti da diversi ambiti e discipline, quali: la meccanica, l'acustica, l'elettronica e la scienza dei materiali. Un passaggio fondamentale per lo sviluppo di dispositivi micro-elettro-meccanici è la creazione di modelli capaci di predire il loro comportamento in determinate condizioni di lavoro. Una volta formulato un modello numerico efficace, esso può essere utilizzato per comprenderne il comportamento e per l'ideazione di nuove configurazioni che portino ad un miglioramento delle prestazioni.

Questo è l'obiettivo della tesi, facendo riferimento al mondo dei microspeakers, si indagano alcune configurazioni di dispositivi ad attuazione piezoelettrica che migliorino le prestazioni dei microspeakers proposti in letteratura. Questo lavoro di tesi è stato condotto nell'ambito di una collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano e la società STMicroelectronics, leader nella produzione di componenti elettronici a semiconduttore.

L'elaborato riprende inizialmente le tecniche di produzione dei sistemi micro-elettro-meccanici focalizzandosi sui processi di deposizione di strati sottili di materiale, questo perché le strutture a cui si fa riferimento, come detto in precedenza, sono

strutture multistrato. Segue lo studio dello stato dell'arte effettuato per prendere coscienza dei dispositivi già ideati e prodotti. Passando per un capitolo dedicato alle leggi fisiche che governano il problema multi-fisico, si arriva al capitolo della modellazione vera e propria dei dispositivi. Di seguito viene illustrata nel dettaglio l'organizzazione dell'elaborato.

## **1.2 Organizzazione dell'elaborato:**

Il **Capitolo 2** illustra brevemente il mondo dei MEMS. Partendo da una descrizione generale di come sono fatti e come funzionano, si arriva alla descrizione delle tecniche produttive di strutture mobili microscopiche ed alle tecniche di deposizione di strati sottili di materiali quali sputtering e deposizione sol-gel, dal momento che i sistemi che si studiano nell'elaborato utilizzano strati sottili di materiali.

Il **Capitolo 3** presenta lo stato dell'arte dei sistemi presi in considerazione nell'elaborato: i microspeakers. Si discutono diversi tipi di microspeakers ponendo particolare attenzione a quelli che utilizzano un'attuazione piezoelettrica. Di ogni dispositivo preso in considerazione viene fatta un'accurata descrizione e vengono valutate le prestazioni tramite l'analisi di alcuni parametri di riferimento, in particolare, emissione sonora e distorsione armonica del segnale.

Il **Capitolo 4** serve a richiamare le principali leggi della fisica che intervengono nel funzionamento dei microspeakers. Vengono analizzate le leggi della piezoelettricità, dell'acustica classica e dell'acustica termoviscosa. Si illustrano inoltre le modalità con cui queste si accoppiano nella descrizione del problema multi-fisico che governa il funzionamento dei microspeakers.

Nel **Capitolo 5** si mostrano i modelli riprodotti per mezzo del software COMSOL Multiphysics. Si ripercorrono tutti i passaggi seguiti nella modellazione e si analizzano i dati ottenuti dalle analisi fatte sui modelli. Nella prima parte si riproducono dispositivi presenti in letteratura, nella seconda parte si modellano nuove configurazioni di dispositivi ideate per cercare di migliorare le prestazioni dei dispositivi visti nello stato dell'arte.

Il **Capitolo 6** presenta le conclusioni tratte dalla modellizzazione di nuove configurazioni di microspeakers ad attuazione piezoelettrica e gli sviluppi futuri relativi al progetto presentato.



# 2

## **MEMS: COSA SONO E COME SI PRODUCONO**

### **2.1 Cosa sono i MEMS?**

I sistemi micro-elettro meccanici, comunemente noti con il nome di MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), sono dispositivi aventi dimensioni estremamente ridotte in cui si combinano componenti meccaniche mobili e componenti elettroniche al fine di ottenere specifici comportamenti di attuazione o di rilevazione [1]. Data la loro versatilità, i microsistemi trovano impiego in svariate applicazioni come, ad esempio, telefoni cellulari, computer portatili, auricolari e molti altri dispositivi di comune utilizzo. Le dimensioni tipiche di questi oggetti variano tra i micron ( $10^{-6}$  metri) e i millimetri ( $10^{-3}$  metri). L'ideazione e realizzazione dei MEMS è avvenuta per la necessità di miniaturizzazione che negli ultimi anni è cresciuta costantemente portando alla realizzazione di dispositivi sempre più piccoli, ad alte prestazioni e di basso costo. Al loro celere sviluppo ha sicuramente contribuito anche il fatto che le tecniche con cui vengono prodotti sono derivate da quelle già in uso per la produzione di componenti elettronici come i circuiti stampati [2].

I MEMS possono fungere sia da attuatori che da sensori. Solitamente, infatti, il dispositivo viene integrato su un circuito stampato e interagisce sia con le componenti elettroniche che elaborano i dati, sia con l'ambiente circostante. Nel caso in cui si stia parlando di un attuttore il processo implica che venga mandato un segnale elettrico al dispositivo il quale compirà determinate azioni meccaniche in accordo con il segnale in arrivo. Nel caso in cui il MEMS sia un sensore, invece, sarà l'azione meccanica, stimolata da agenti esterni, ad essere tradotta in un segnale elettrico che verrà poi trasportato e analizzato.

In un primo momento lo sviluppo di micro-attuatori è stato più lento rispetto a quello di micro-sensori a causa di una iniziale mancanza di applicazioni che avessero bisogno di una microattuazione e la difficoltà di collegare quest'ultima al mondo macroscopico. Una volta iniziato lo sviluppo di questi dispositivi, i tipi di attuazione, che dapprima era solamente elettrostatica, sono stati ampliati nel tempo. Ne sono alcuni esempi: l'attuazione magnetica, a memoria di forma, termica e piezoelettrica [3].

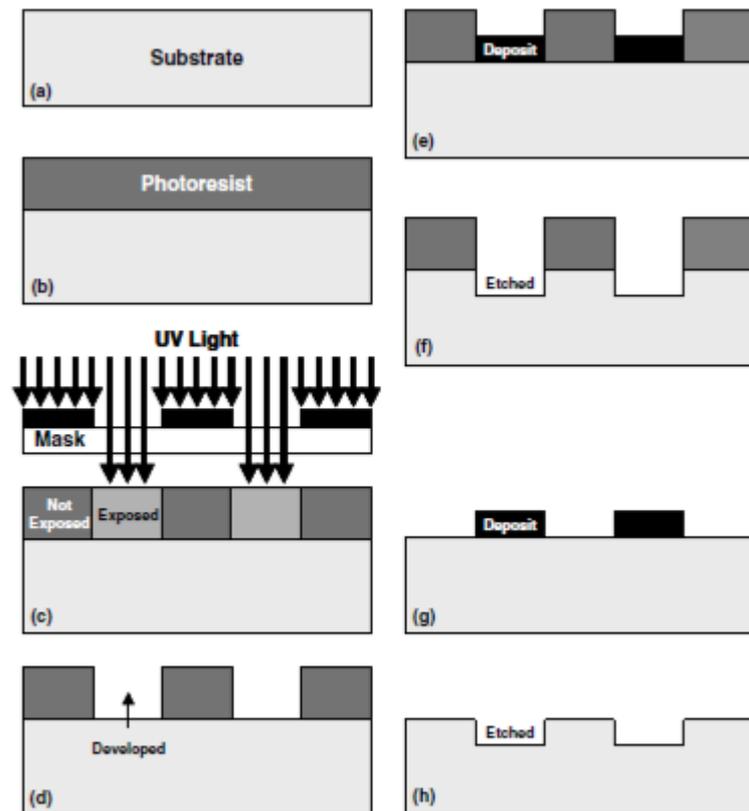
La ricerca nell'ambito dei MEMS è in continua evoluzione, in particolare per quanto riguarda l'utilizzo di nuovi materiali e un'ulteriore diminuzione delle dimensioni. Lo studio di nuovi materiali infatti potrebbe portare ad un'efficienza ancora superiore di questi dispositivi e potrebbe anche influenzare la miniaturizzazione. Per quanto riguarda questa tematica un ambito di ricerca già in atto da tempo, ma in cui i margini di sviluppo sono ancora ampi è sicuramente la progettazione di microsistemi ad attuazione piezoelettrica, sfruttando quindi le caratteristiche di specifici composti ceramici. L'ulteriore riduzione delle dimensioni, invece, sebbene possa essere un punto di svolta per la realizzazione di dispositivi elettronici, è più difficile in prospettiva industriale in quanto, arrivando a dimensioni nanometriche, si riscontrano fenomeni quantistici significativi e non sono ancora disponibili tecniche di produzione adatte ad una produzione di massa.

## **2.2 Produzione dei MEMS**

Il materiale principalmente utilizzato in elettronica, e quindi anche nella produzione di dispositivi micro-elettro meccanici, è il Silicio. Questo materiale viene utilizzato poiché, unitamente alle sue ottime proprietà elettroniche, date dalla sua natura di semiconduttore, presenta eccellenti proprietà meccaniche [4].

Molte delle tecniche utilizzate per la produzione dei MEMS sono in condivisione con la produzione dei circuiti integrati. L'esempio più eclatante di tecnica comune ai due processi produttivi è la fotolitografia [2].

La fotolitografia permette la produzione di dispositivi di dimensioni microscopiche in grandi volumi. I passaggi fondamentali di questa tecnica sono mostrati in figura 2.1.



**Figura 2.1:** Schematizzazione del processo fotolitografico [2].

Il processo inizia dalla selezione di un materiale come substrato. Tipicamente viene utilizzato un wafer di Silicio monocristallino, ottenuto dal taglio di un lingotto di Silicio, con diametro tra i 20 e i 30 cm e uno spessore di circa mezzo millimetro. Il substrato viene ricoperto da uno strato di polimero fotosensibile chiamato photoresist.

Una maschera costituita da zone trasparenti e zone opache viene utilizzata per la selezione fisica di certe zone del photoresist. Viene infatti utilizzata della luce ultravioletta che riesce a raggiungere il photoresist solamente nelle zone in cui la maschera lo consente. Le regioni che rimangono esposte ai raggi UV vengono chimicamente alterate. In seguito all'esposizione il photoresist viene immerso in una soluzione sviluppatrice che rimuove chimicamente o il positivo o il negativo della maschera, a seconda delle interazioni chimiche a cui quindi si deve fare particolare attenzione nella fase di progettazione e selezione dei materiali. Dopodiché il wafer viene asciugato e il photoresist può essere usato come maschera per una deposizione successiva (processo additivo) o per un processo di decapaggio (processo sottrattivo). Infine, il photoresist viene rimosso selettivamente lasciando solamente il substrato micro-lavorato [2].

Le tecniche di lavorazione per la creazione di microstrutture tridimensionali possono essere divise in due categorie principali: *Bulk Micromachining* e *Surface Micromachining*.

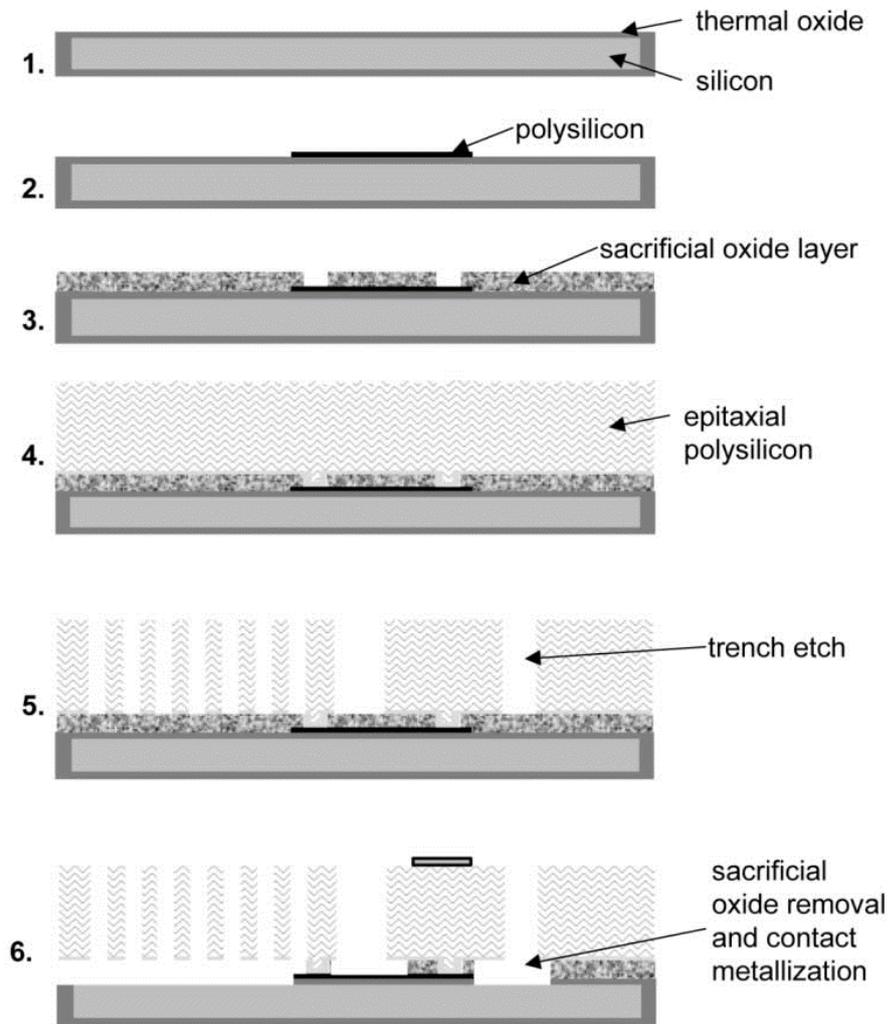
Per quanto riguarda le tecniche di microlavorazione di Bulk la più diffusa è sicuramente il *Chemical Wet Etching*, lavorazione in cui il substrato di Silicio viene immerso in una specifica soluzione che erode il materiale ad una velocità nota. L'erosione può essere sia isotropa che anisotropa a seconda della soluzione utilizzata e dell'orientamento dei piani cristallografici esposti ad essa. Nel primo caso l'erosione avviene con uguale velocità in tutte le direzioni, nel secondo caso è presente una direzione in cui la velocità di erosione risulta essere maggiore.

Passando invece alle tecniche di *Surface Micromachining*, queste permettono la costruzione di microstrutture tramite deposizione e il conseguente decapaggio di singoli strati di materiale al di sopra di un substrato. Queste tecniche permettono un ottimo controllo delle dimensioni sia orizzontale che verticale e la creazione di strutture complesse sia come stratificazione che come design [2].

Un particolare tipo di processo di *Surface Micromachining* è il "ThELMA" (*Thick Epipoly Layer for Microactuators and Accelerometers*) sviluppato da STMicroelectronics, azienda leader nel settore, per la realizzazione di attuatori in silicio [5].

Si illustra nel dettaglio questo procedimento (figura 2.2) poiché, pur con le proprie specificità, è esplicativo e riassuntivo di quelle che sono le tecniche di microlavorazione superficiale utilizzate attualmente per la produzione di microstrutture mobili in Silicio. Le fasi che caratterizzano il processo sono le seguenti:

1. Ossidazione termica del substrato che viene ricoperto con uno strato di ossido spesso 2,5  $\mu\text{m}$  ottenuto tramite trattamento termico a 1100°C.
2. Deposizione e modellazione delle interconnessioni orizzontali: viene depositato un primo strato di Silicio policristallino che serve a definire dove saranno collocati i percorsi di connessione tra il MEMS e il dispositivo elettronico su cui è implementato.
3. Deposizione e modellazione del "*Sacrificial Layer*", strato di ossido depositato tramite PECVD che separa le parti mobili del dispositivo dal substrato.
4. Crescita epitassiale dello strato strutturale in Silicio policristallino per uno spessore di circa 15  $\mu\text{m}$ .
5. Decapaggio dello strato strutturale tramite "*Deep Trench Etch*" che arriva fino allo strato di ossido andando così a creare le strutture sospese del MEMS.
6. Rimozione del "*Sacrificial Layer*" e deposizione delle interconnessioni orizzontali tramite metallizzazione.



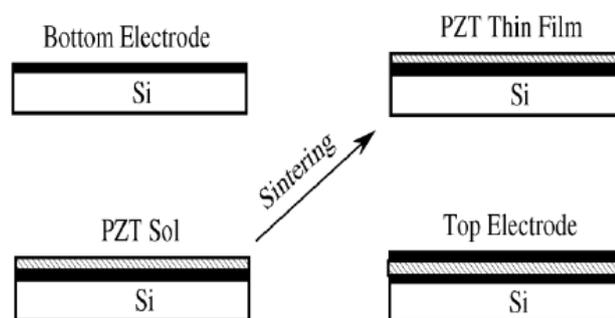
**Figura 2.2:** Schematizzazione dei passaggi del processo ThELMA [5].

## 2.2.1 Deposizione di film sottili

Dal momento che le strutture a cui si fa riferimento nel seguente elaborato sono costituite da strati di piccolo spessore (nell'ordine dei micron) di diversi materiali, si è deciso di introdurre questo paragrafo in cui si ripercorrono le principali tecniche di deposizione di film sottili, in particolare per quanto riguarda il materiale piezoelettrico, nel caso dei microspeakers, il PZT. Esistono diverse tecniche che permettono di depositare film sottili di un materiale su un substrato e in generale queste tecniche possono essere divise in due macrocategorie: fisiche e chimiche. Fanno parte della prima categoria tecniche come lo sputtering tramite fascio ionico, il magnetron sputtering tramite radio frequenze e la deposizione per mezzo di laser pulsato; per quanto riguarda tecniche appartenenti alla seconda categoria, invece, si citano la deposizione sol-gel, la decomposizione metallorganica e la MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition). Di seguito vengono riportate nel dettaglio due tecniche che sono state le più studiate negli anni recenti: la deposizione sol-gel e lo sputtering [6].

### 2.2.1.1 Deposizione Sol-Gel

Il processo di deposizione sol-gel segue dei passaggi ben definiti. Il primo passo per la deposizione di materiale piezoelettrico è la deposizione dell'elettrodo inferiore sul substrato in Silicio che insieme all'elettrodo superiore servirà ad attivare il PZT. In seguito, si procede con il rivestimento per immersione o spin-coating di PZT sol su substrato di Silicio, questo strato viene in seguito sinterizzato ad alte temperature (600°C-700°C) per tempi che variano tra le quattro e le sei ore. Questo processo permette la riduzione della porosità e la formazione della struttura cristallina desiderata. Infine, si procede con la deposizione dell'elettrodo superiore. Il secondo ed il terzo passaggio possono essere ripetuti più volte fino al raggiungimento dello spessore desiderato per il film di PZT [7]. I Quattro passaggi riportati sopra vengono illustrati nella seguente figura:



**Figura 2.3:** Passaggi fondamentali della deposizione di film sottili di materiale tramite tecnica di deposizione sol-gel [7].

Le proprietà del materiale piezoelettrico dipendono fortemente dal rapporto stechiometrico degli elementi che lo compongono. Con questa tecnica di produzione il controllo sulla stechiometria della deposizione è molto accurato, il che risulta essere uno dei maggiori vantaggi di questa tecnica. Unitamente ad esso la tecnica sol-gel è molto utilizzata dato il suo basso costo dovuto alla completa riutilizzabilità dei precursori utilizzati nel processo. Ci sono anche degli svantaggi connessi a questa tecnica, ad esempio la possibile formazione di difetti che possono portare alla formazione di cricche o alla delaminazione. Quest'ultima avviene a causa degli alti sforzi di taglio che si accumulano all'interfaccia tra l'elettrodo inferiore e lo strato di PZT durante il raffreddamento dopo la fase di sinterizzazione, data la grande differenza tra i loro coefficienti di espansione termica. Inoltre, la presenza di cricche potrebbe portare ad un cortocircuito tra i due elettrodi, causando aging e rottura del film di PZT. Un ulteriore problema è legato al comportamento che il materiale di cui è costituito l'elettrodo inferiore esibisce alle alte temperature raggiunte durante la fase di sinterizzazione. Infatti, se a temperatura ambiente le proprietà di barriera alla diffusione e l'adesione al PZT sono garantite, alle alte temperature la formazione di porosità all'interno dell'elettrodo inferiore le inibisce. La porosità, infatti, facilita la diffusione dell'ossido dallo strato di PZT fino al substrato risultando in una perdita dielettrica e in fatica. Oltretutto, quando vengono utilizzati elettrodi ossidati, si ha diffusione verso lo strato depositato con conseguente variazione della composizione chimica che porta a prestazioni inferiori del materiale piezoelettrico che non si trova più nelle condizioni di ottimo per quanto riguarda la composizione chimica. Infine, un'ultima complicazione nell'utilizzo di questa tecnica è legata al fatto che le proprietà piezoelettriche aumentano aumentando la dimensione dei grani che costituiscono il layer. Per avere grani di dimensioni maggiori bisogna aumentare la temperatura di sinterizzazione dello strato, ma come visto in precedenza, questo porta ad un aumento della probabilità di delaminazione tra l'elettrodo inferiore e lo strato di piezoelettrico e ad una diminuzione delle proprietà piezoelettriche dovuta alla volatilità dell'ossido di Piombo [7].

### 2.2.1.2 Sputtering

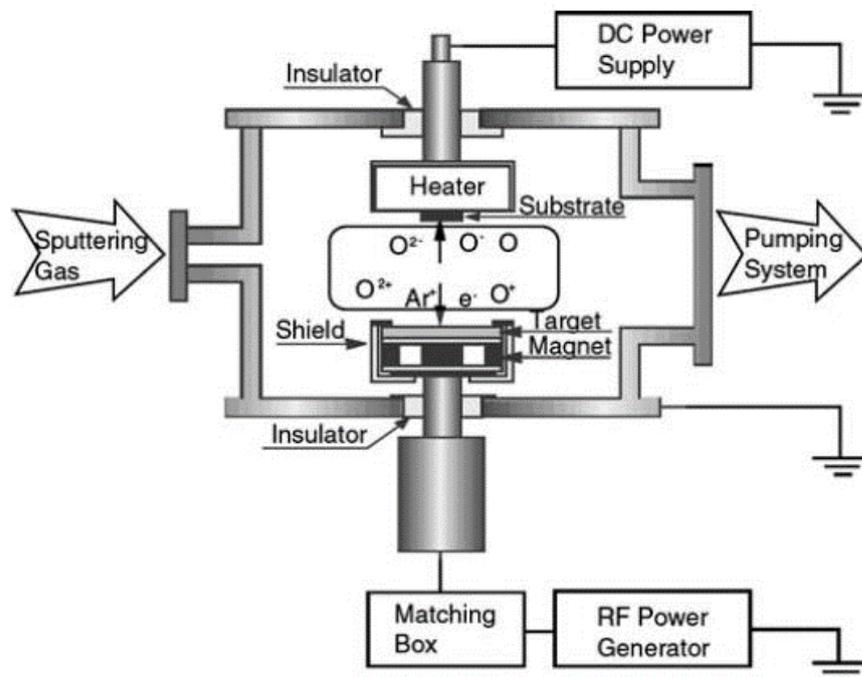
Un'altra tecnica largamente utilizzata per la deposizione di film sottili di materiali piezoelettrici è lo sputtering. Questa tecnica mostra notevoli vantaggi come, ad esempio, l'alto tasso di deposizione, l'uniformità dello spessore di materiale depositato su tutta la superficie e la bassa concentrazione di impurezze residue nel layer.

Il processo consiste nell'evaporazione di un target di PZT tramite un fascio di ioni. Gli ioni utilizzati sono ioni di gas inerti come, ad esempio, l'argon a pressioni di 0,1-10 [Pa]. Questi ultimi vengono indirizzati verso il target e, possedendo energie molto elevate, rimuovono le specie atomiche del materiale piezoelettrico che

vanno a depositarsi sulla superficie del substrato. Così facendo, il film depositato avrà la stessa composizione chimica del target.

In generale esistono due tipologie di sputtering che si differenziano in base al tipo di target utilizzato a seconda che esso sia conduttore o isolante. Queste due tecniche sono: DC (corrente diretta) sputtering e RF (radio frequenze) sputtering.

Per quanto riguarda il caso specifico di deposizione di strati di materiale piezoelettrico viene utilizzato l' RF magnetron sputtering. Nella seguente figura viene illustrato lo schema di un sistema che attua questo tipo di deposizione. Per la deposizione di PZT il target viene preparato a partire da polveri di: ossido di Piombo (PbO), ossido di Titanio (TiO<sub>2</sub>) e ossido di Zirconio (ZrO<sub>2</sub>) con un eccesso di ossido di Piombo per compensare le perdite che si hanno relative a questo componente alle alte temperature, data la sua grande volatilità. Quest'ultima costituisce il più grande svantaggio di questa tecnica, andando a rendere difficile il controllo della composizione del film depositato. Le proprietà dello strato di piezoelettrico, inoltre, dipendono anche da molte altre variabili del processo di sputtering come la temperatura del substrato e la distanza tra il target ed il substrato [7].



**Figura 2.4:** Schematizzazione del processo di sputtering RF [7].

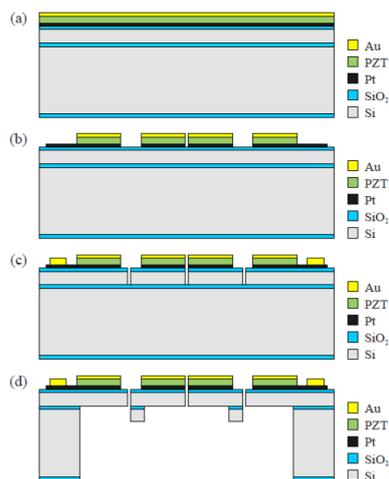
## 2.2.2 Processi produttivi di microspeakers presenti nello stato dell'arte

Dopo aver introdotto le tecniche generali di produzione dei microdispositivi e le tecniche di deposizione specifiche per lo sviluppo di strutture contenenti film sottili di materiale piezoelettrico, si discutono ora due esempi di processi produttivi presenti nello stato dell'arte ed utilizzati per la produzione di microspeakers.

### 2.2.2.1 Dispositivi ideati presso l'Istituto Fraunhofer ISIT [8]

Questo processo inizia dalla realizzazione di uno strato di Silicio policristallino spesso 15 [ $\mu\text{m}$ ] sopra ad un substrato spesso 200 [ $\mu\text{m}$ ] costituito da ossido di Silicio. Dopodiché viene depositato un ulteriore strato di  $\text{SiO}_2$  che funge da isolante e su cui viene evaporato un layer di Platino che costituirà l'elettrodo inferiore. Il passaggio successivo è la deposizione, tramite RF magnetron sputtering, del materiale piezoelettrico che consiste di un layer spesso 2 [ $\mu\text{m}$ ] di PZT seguito dalla deposizione di Oro che costituirà l'elettrodo superiore.

Dopo la realizzazione di questo ultimo passaggio, gli strati depositati che costituiscono l'attuazione del dispositivo (elettrodo inferiore, PZT ed elettrodo superiore) vengono sottoposti a modellazione per mezzo di wet e dry etching. Successivamente vengono usate le tecniche: RIE (reactive ion etching) e DRIE (deep reactive ion etching) per il decapaggio dei layer andando a formare delle fenditure nel Silicio policristallino. Infine, la struttura viene corrosa anche sul retro tramite la tecnica di DRIE in modo tale da ottenere la struttura mobile [8].

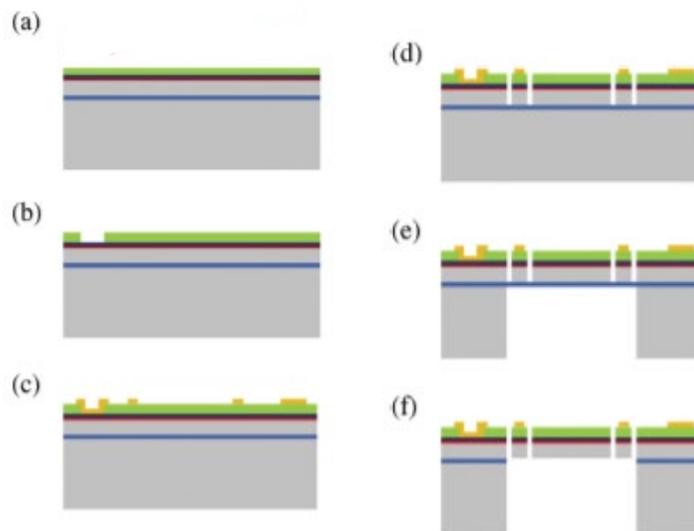


**Figura 2.5:** Deposizione di tutti gli strati funzionali (a); modellazione del PZT e degli elettrodi (b); modellazione dello strato di Silicio policristallino (c); DRIE sul retro del dispositivo per il rilascio della struttura (d) [8].

### 2.2.2.2 Dispositivi ideati presso la National Tsing Hua University di Taiwan [9]

Il primo passaggio per la produzione di questi dispositivi è la deposizione, sullo strato di Silicio spesso 5 [ $\mu\text{m}$ ] del SOI wafer, di due strati contigui di zirconia ( $\text{ZrO}_2$ ), spesso 15 [nm], e Platino (Pt), spesso 150 [nm]. Questi due strati costituiranno, nel dispositivo ultimato, l'elettrodo inferiore. Il ruolo della zirconia, in realtà, è solamente quello di favorire l'adesione del Platino e fungere da strato isolante che eviti la dispersione della corrente. Il passaggio successivo è la deposizione dello strato di PZT, spesso 1 [ $\mu\text{m}$ ] o 2 [ $\mu\text{m}$ ] (a seconda del dispositivo considerato), tramite sputtering e la sua seguente modellazione per mezzo di tecniche di dry etching. Dopodiché sono stati depositati e modellati uno strato di Cromo, spesso 20 [nm], ed uno strato di Oro, spesso 200 [nm], che svolgeranno la funzione di elettrodo superiore.

Dopo aver concluso i passaggi di deposizione e patterning degli elettrodi e del PZT, vengono realizzate frontalmente delle fenditure nel layer di PZT, tramite l'utilizzo dell'ICP (inductively coupled plasma) etching, per definire le strutture delle molle e del diaframma. In seguito a questo passaggio, però, può succedere che rimangano delle particelle di PZT sul film di Platino, il che potrebbe andare ad interferire con i successivi passaggi di decapaggio. Per questo motivo il wafer viene immerso in una soluzione con l'1% di NaF e il 10% di HCl. Infine, dopo aver utilizzato nuovamente l'ICP etching per creare le fessure nel Platino, si procede con l'utilizzo di DRIE per definire il retro del dispositivo e successivamente il RIE è utilizzato per rimuovere lo strato di ossido del SOI wafer e rilasciare le geometrie relative a molle e diaframma del microspeaker [9].



**Figura 2.6:** Schematizzazione del processo di deposizione utilizzato dai ricercatori dell'Università di Taiwan [9].



# 3

## MICROSPEAKERS: STATO DELL'ARTE

### 3.1 Microspeakers

I microspeakers sono degli attuatori micro-elettro meccanici la cui funzione fondamentale è quella di tradurre un segnale elettrico in una vibrazione meccanica che permetta l'emissione di suono nella banda dell'udibile che si estende tra gli 0 [kHz] e i 20 [kHz]. Microsistemi di questo genere vengono implementati in strutture più complesse come, ad esempio, auricolari e apparecchi acustici.

Questi dispositivi sono molto studiati negli ultimi anni poiché potrebbero rivelarsi rivoluzionari nel loro ambito, in quanto molto promettenti come prestazioni (buona generazione di suono con bassi livelli di distorsione) con un consumo energetico e un ingombro volumetrico nettamente inferiori ai microspeakers elettrodinamici attualmente in commercio.

La valutazione delle prestazioni è un passaggio fondamentale nella realizzazione di un microspeaker affinché possa, in seguito, essere implementato in dispositivi elettronici. Il raggiungimento di un'ottima qualità del suono è lo scopo ultimo della ricerca in questo ambito. Per valutare la bontà o meno delle prestazioni di questo tipo di

microstrutture ci sono diversi parametri a cui fare riferimento. Di seguito vengono discussi i due principali.

### 3.1.1 Risposta in frequenza

Come accennato nei paragrafi precedenti, l'obiettivo dei microspeakers è quello di emettere suono il più uniformemente possibile in tutta la banda dell'udibile. Questa valutazione viene fatta tramite la misura del livello di pressione sonora (SPL) generata su tutta la banda dell'udibile.

Il livello di pressione sonora viene generalmente descritto in scala logaritmica, questo perché l'intervallo di frequenze prese in considerazione è molto ampio; è anche molto ampio il range delle intensità udibili, che varia tra i  $10^{-12}$  e i  $10$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

La scala logaritmica più utilizzata per descrivere i livelli sonori è la scala decibel [dB]. Il livello di intensità ( $IL$ ) di un suono di intensità " $I$ " viene definito dalla formula:

$$IL = 10 \log \left( \frac{I}{I_{ref}} \right) \quad [3.1]$$

In cui " $I_{ref}$ " è l'intensità di riferimento. La IL è espressa in [dB].

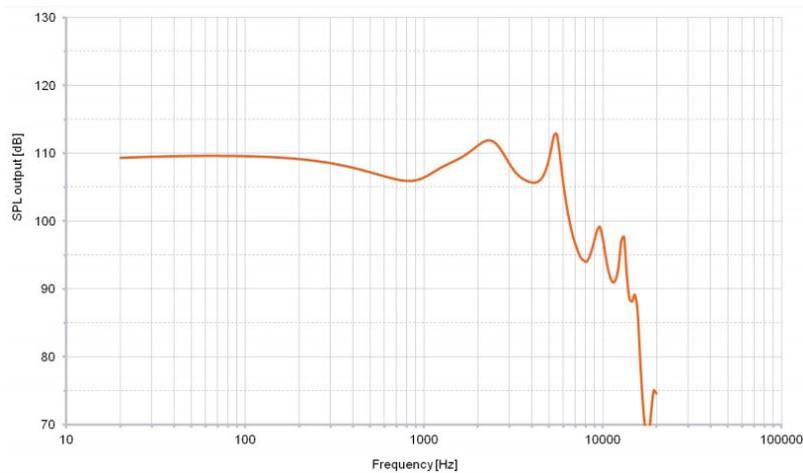
Si può facilmente trovare poi la relazione che lega il livello di intensità alla pressione effettiva dell'onda generata:

$$I = \frac{P_e^2}{\rho_0 c} \quad [3.2]$$

Di conseguenza la formula della SPL generata:

$$SPL = 20 \log \left( \frac{P}{P_{ref}} \right) \quad [3.3]$$

In cui  $P_{ref}$  è l'ampiezza RMS della pressione di riferimento, nel caso specifico, per l'aria, vale:  $20$  [ $\mu\text{Pa}$ ] RMS [10].



**Figura 3.1:** Esempio di curva della risposta in frequenza. [12]

### 3.1.2 Distorsione armonica

Il secondo parametro fondamentale da tenere in considerazione nello studio e progettazione di microspeakers è il livello di distorsione sonora, ovvero quanto il suono emesso dal microattuatore sia differente rispetto al segnale che viene dato come input al dispositivo.

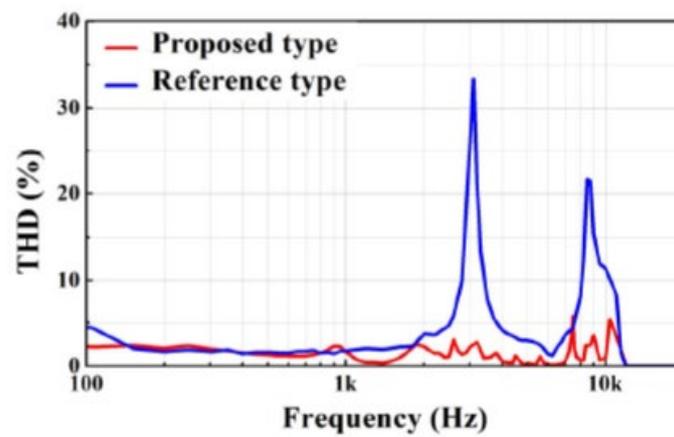
Per verificare questa grandezza viene comunemente utilizzato come parametro la THD (total harmonic distortion). Nei dispositivi elettro-acustici quest'ultima è data dal rapporto tra il valore efficace della pressione sonora misurata alle armoniche ( $k_2, k_3, \dots, k_n$ ) della frequenza di risonanza ( $k_1$ ) e il valore efficace della pressione sonora a  $k_1$ . Dove le  $k$  sono le pressioni sonore misurate in [mPa]:

$$\text{THD}_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} k_i^2}}{k_1} \cdot 100 \quad [3.4]$$

Per essere ancora più precisi sulla misurazione c'è un altro indice a cui si può fare riferimento che è la WTHD (weighted total harmonic distortion) che dà una misura dell'inquinamento armonico utilizzando l'ordine «n» di ogni armonica “ $k_n$ ” come coefficiente di ponderazione [11]:

$$\text{WTHD} = \frac{1}{k_1} \cdot \left[ \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{k_n}{n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [3.5]$$

Per la misura della THD si segue generalmente lo standard *IEEE Std. 519-2014* [11].



**Figura 3.2:** esempio di curva che riporta i livelli di THD [17].

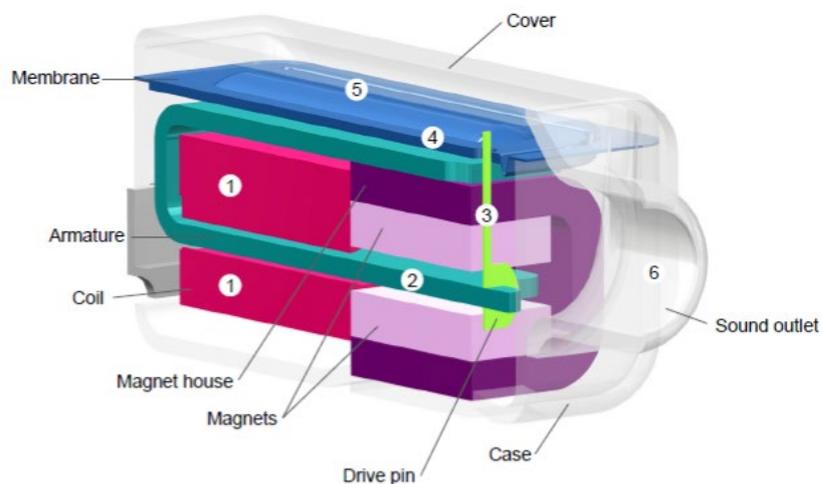
## 3.2 Tipologie di microspeakers

Esistono diversi tipi di microspeakers che si differenziano per struttura, materiali utilizzati e tipologia di attuazione. Di seguito vengono analizzati diversi dispositivi, alcuni già in commercio, altri ancora in fase di sperimentazione. La descrizione comprende, oltre che alla struttura e al tipo di attuazione, anche dati relativi alle prestazioni dei dispositivi in modo tale da riuscire, nei capitoli successivi, a fare un confronto con i nuovi modelli studiati e proposti.

### 3.2.1 Balanced armature microspeakers

I microspeakers “balanced armature” basano il loro funzionamento sul movimento, stimolato da un segnale elettrico, di un’armatura che a sua volta mette in vibrazione una membrana la quale permette lo spostamento di un certo volume d’aria, andando così a generare un’onda acustica.

Facendo riferimento ai dispositivi prodotti dall’azienda Sonion, leader nella produzione di microspeakers balanced armature, si presenta una tipologia di struttura che, in linea di massima, rispecchia questa categoria di dispositivi.



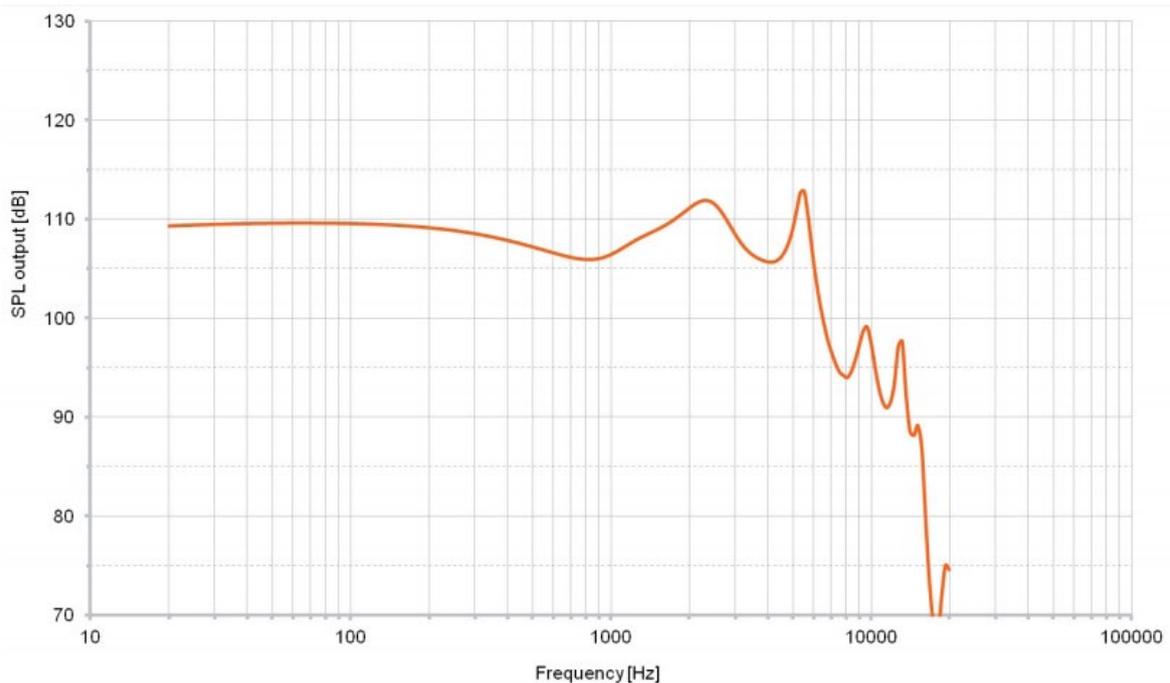
**Figura 3.3:** Esempio di dispositivo balanced armature. [27]

Come si vede in figura 3.3 il dispositivo è costituito da una bobina in cui viene fatta passare la corrente elettrica che porta il segnale che dovrà essere emesso acusticamente. La bobina, quando è percorsa da corrente, genera un campo elettrico all'interno dell'armatura il cui prolungamento è posto in un campo magnetico generato da magneti permanenti. Questo fa sì che l'armatura inizi a vibrare causando anche la

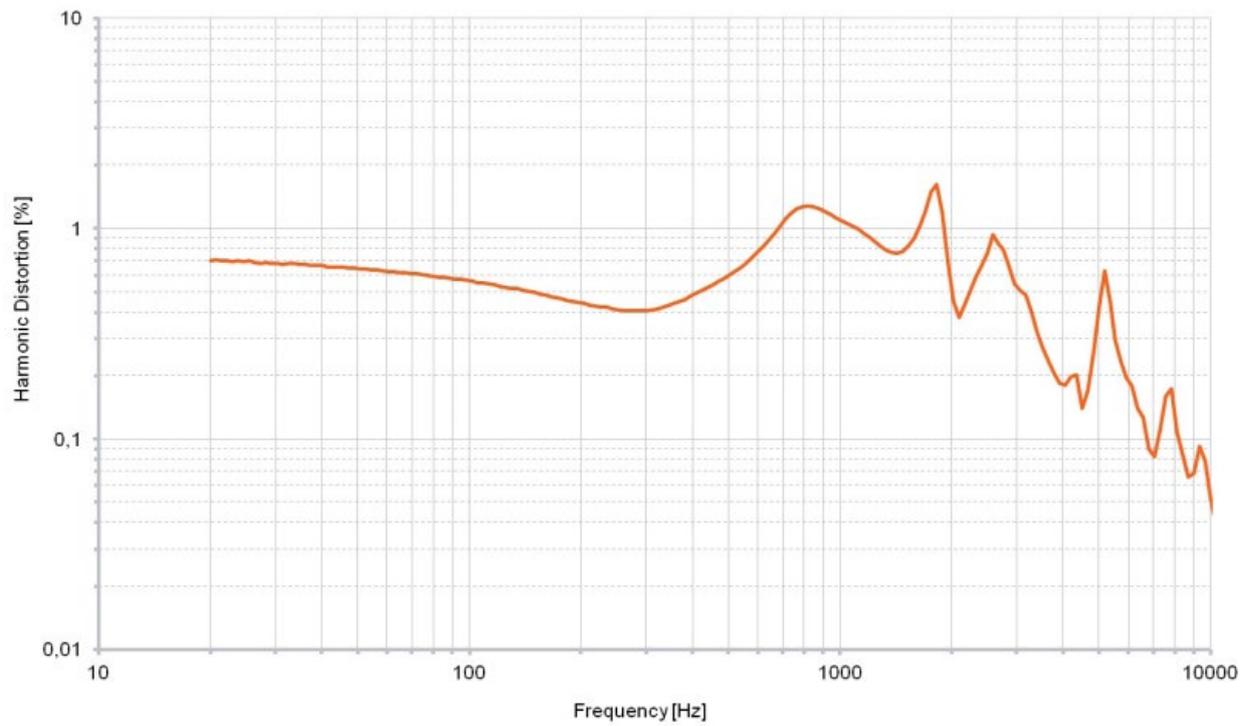
vibrazione di un perno di trasmissione posto su di essa e collegato ad una membrana. Il movimento della membrana, infine, genera una variazione di pressione nell'aria soprastante che è condotta al di fuori del dispositivo attraverso un foro di uscita.

Si analizza nel dettaglio il comportamento del dispositivo: “Receiver 26A005/8” utilizzato come attuttore per applicazioni in-ear e descritto dalla azienda produttrice come “driver full range” cioè un microattuttore che emette in tutta la banda dell'udibile. Le dimensioni di questo dispositivo sono di 5,25 x 3,05 x 2,55 [mm<sup>3</sup>] [12].

Per quanto riguarda le curve di riferimento del dispositivo preso in esame (fig. 3.4 e fig. 3.5), per un'attuazione di 0.100 V RMS, si può notare come il livello di dB SPL sia buono, intorno ai 110 dB, fino ai 6kHz avendo poi un rapido calo; inoltre, il livello di distorsione armonica totale è molto basso su tutta la banda dei suoni emessi, e assume valori intorno all'1%.



**Figura 3.4:** Curva di risposta in frequenza del dispositivo balanced armature: “Receiver 26A005/8”; [12]



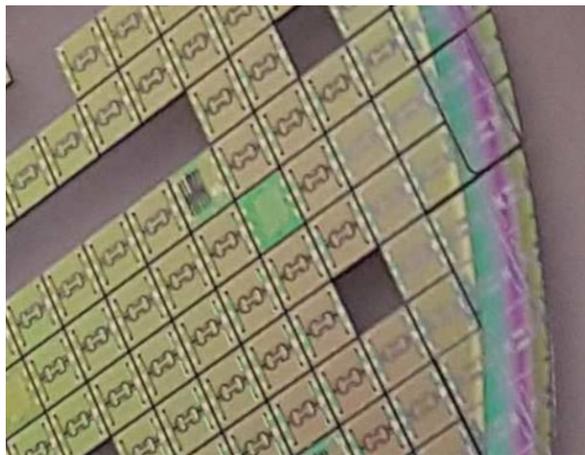
**Figura 3.5:** curva di distorsione armonica totale del dispositivo balanced armature “Receiver 26A005/8” [12].

### 3.2.2 USound piezo microspeakers

I dispositivi prodotti dalla compagnia USound [13] sono microspeakers che sfruttano le proprietà piezoelettriche di alcuni materiali ceramici per l'attuazione del dispositivo. In particolare, il materiale piezoelettrico utilizzato in questi dispositivi è il PZT, ovvero il piombo zirconato titanato, che proprio grazie alle sue caratteristiche risulta essere il miglior materiale disponibile per essere applicato nei micro-attuatori.

Il principio di funzionamento di questa tipologia di dispositivi si basa quindi sull'effetto piezoelettrico. Infatti, per l'attuazione di questi microspeakers viene fornita una tensione agli estremi del materiale piezoelettrico tramite degli elettrodi disposti opportunamente. Questa energia fornita sotto forma di voltaggio attiva il materiale piezoelettrico che cambia la propria forma trasformando quindi l'energia che gli viene fornita (elettrica) in energia meccanica.

Il movimento che viene attivato in questo modo è un movimento "a pistone" che permette lo spostamento del volume di aria soprastante la membrana.



**Figura 3.6:** Porzione di wafer di Silicio utilizzato per la produzione di microspeakers da USound. [13]

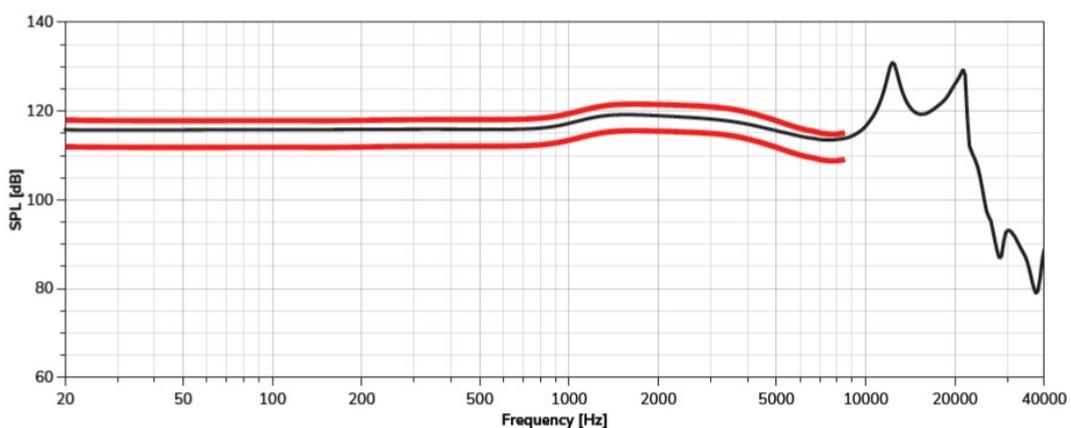
Il diaframma, sostenuto da dei cantilever ricoperti di materiale piezoelettrico è incollato ad una piastra di alluminio nella parte centrale del pistone che viene a sua volta collegata ad una membrana polimerica la quale, sigillando il dispositivo, evita che ci siano perdite acustiche e ottimizza l'emissione sonora (fig. 3.7).



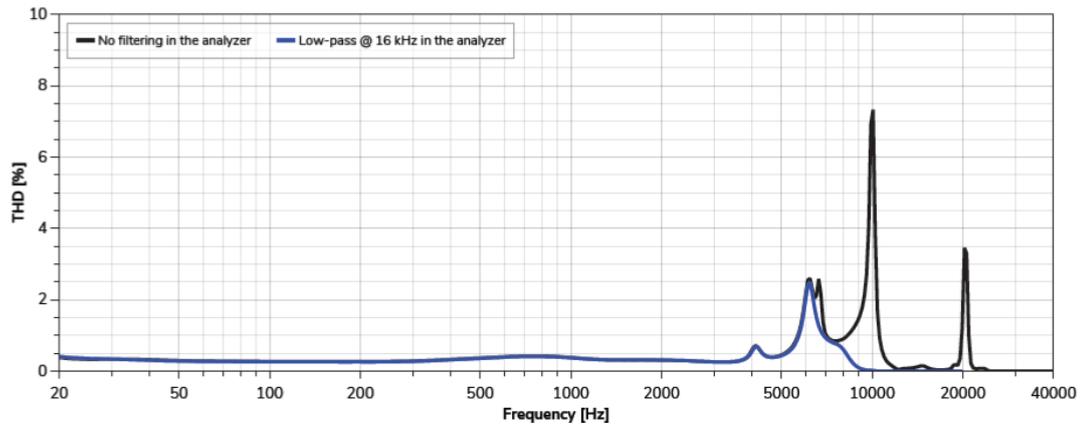
**Figura 3.7:** Dispositivo USound completo di piastra in alluminio e membrana polimerica. [13]

Si analizza nel dettaglio il comportamento del dispositivo: “Achelus” utilizzato come attuttore per applicazioni in-ear. Le dimensioni in pianta di questo dispositivo, comprensivo di package, sono di 4,7 x 6,7 [mm<sup>2</sup>] [14].

Per quanto riguarda i parametri fondamentali per la descrizione di un microspeaker le curve relative sono riportate di seguito, fig. 3.8 e fig. 3.9. L’attuazione utilizzata per ottenere queste curve è di 30V<sub>pp</sub>. Si può notare che la risposta in frequenza presenta valori di dB SPL generati intorno ai 110 [dB] per una banda che si estende dai 20 [Hz] fino ai 10 [kHz] e che la distorsione armonica totale del segnale in uscita dal dispositivo risulta essere circa 0,5% fino ai 4 [kHz] presentando poi picchi nelle frequenze superiori che arrivano fino a valori dell’8%.



**Figura 3.8:** Risposta in frequenza del dispositivo “Achelus” con attuazione di 30 [V<sub>pp</sub>]. [13]

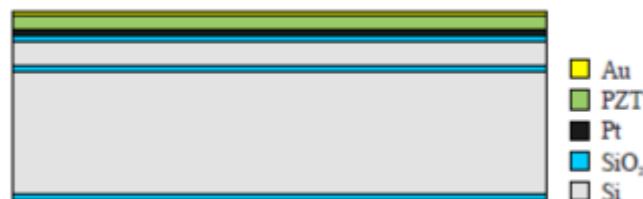


**Figura 3.9:** Distorsione armonica totale del dispositivo “Achelus” per un’attuazione di 30 [V<sub>pp</sub>]. [13]

### 3.2.3 Piezo microspeakers ideati presso l'Istituto Fraunhofer ISIT

In questo paragrafo vengono analizzati dei microspeakers che non hanno ancora raggiunto il mercato, ma che risultano essere molto promettenti a livello di prestazioni [8]. I dispositivi in questione sono caratterizzati, come quello precedente, da un'attuazione di tipo piezoelettrico. A differenza del precedente, però, viene introdotta una novità a livello di configurazione nel senso che questi microspeakers lavorano senza la presenza di una membrana polimerica che sposti uniformemente l'aria, ma, per mezzo di fenditure sottili, viene mantenuto un effetto di chiusura acustica offrendo sensibili miglioramenti sia a livello di prestazioni che di efficienza energetica e di producibilità.

I dispositivi studiati in questa sezione presentano una stratigrafia ben definita in cui uno degli strati è il materiale piezoelettrico (PZT) che, stimolato, genera la deflessione del dispositivo provocando lo spostamento della massa d'aria. In figura 3.10 viene presentata la struttura multi-layer che viene poi modellata diversamente nei diversi dispositivi:



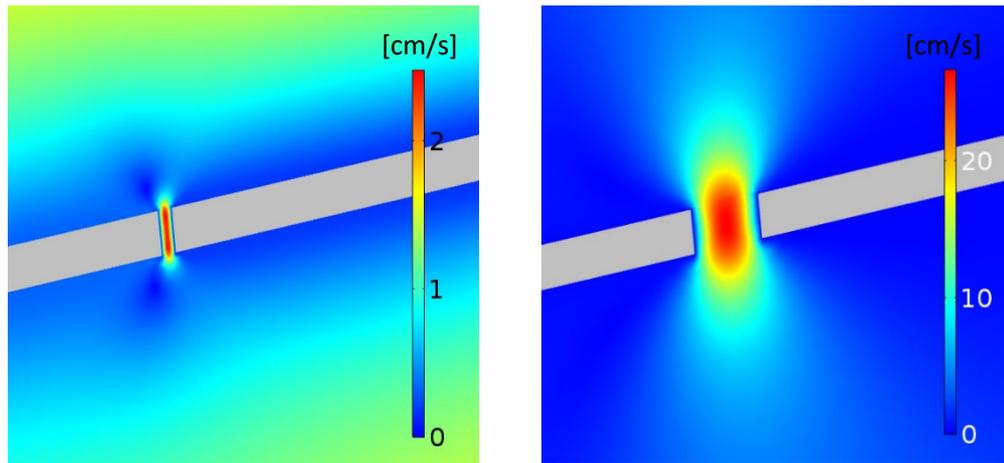
**Figura 3.10:** Stratigrafia dei dispositivi proposti in [8].

La caratteristica fondamentale di questi dispositivi, come si diceva introducendo il paragrafo, è quella di non possedere una membrana polimerica, ma di garantire l'effetto di chiusura acustica tramite degli intagli estremamente ridotti nelle dimensioni.

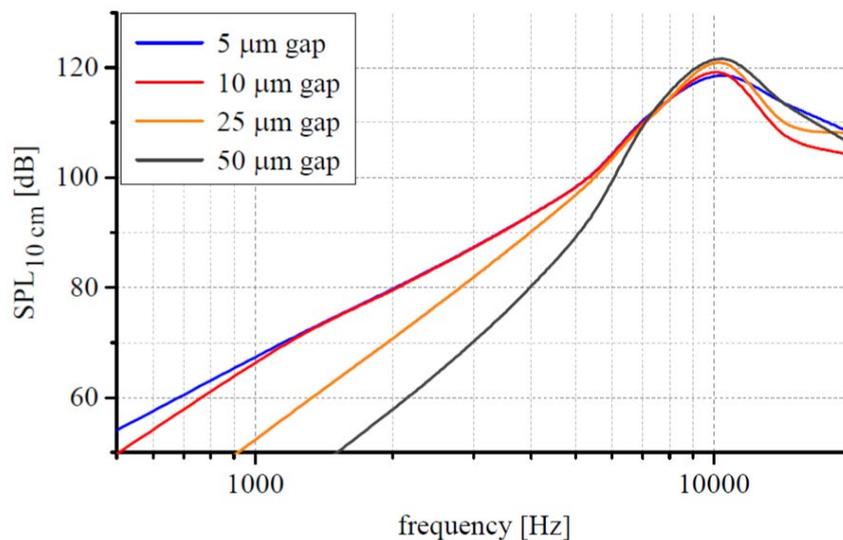
Per determinare l'impatto che gli intagli hanno sul comportamento acustico dei microspeakers sono stati fatti degli studi i cui risultati sono riportati di seguito. In particolare, sono state prese in considerazione diverse ampiezze di intagli e si è studiato il comportamento dell'aria all'interno di essi, osservando che il campo di velocità dell'aria generato in fenditure di 5 [μm] e 25 [μm] è molto diverso. Assumendo infatti una velocità dell'aria sulla superficie acustico-strutturale pari a zero, si è osservato che per intagli di larghezza 5[μm] si ha una perdita minima di aria attraverso di esso, con un impatto generale sul moto del fluido praticamente nullo. Invece, nel caso in cui la fenditura sia di 25 [μm], la velocità media all'interno di essa

aumenta di più di un ordine di grandezza risultando in un flusso d'aria che causa perdite notevoli.

Infine, osservando il livello di pressione acustica generato dai diversi dispositivi di prova, si è notato che le perdite acustiche per fenditure di dimensioni inferiori ai 10  $\mu\text{m}$  svaniscono, mostrando come l'attuatore si comporti come se fosse costituito da una membrana chiusa [8].



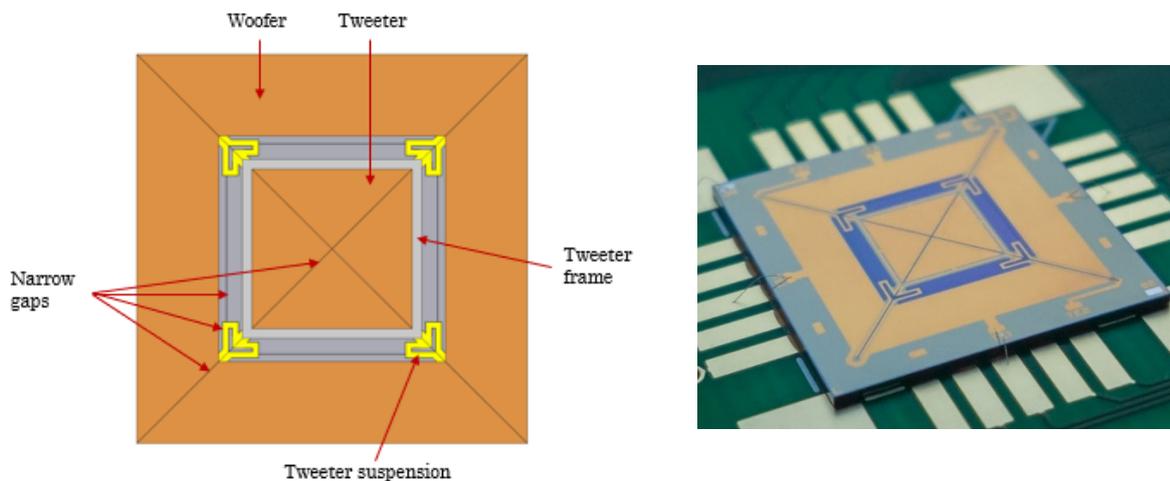
**Figura 3.11:** Campo di velocità dell'aria all'interno delle fenditure. A sinistra il caso di intaglio largo 5  $\mu\text{m}$ ; a destra il caso in cui la fenditura è larga 25  $\mu\text{m}$  in cui si può notare l'incremento di velocità di un ordine di grandezza. [8]



**Figura 3.12:** SPL di un dispositivo tweeter in funzione della frequenza e della larghezza delle fenditure. Voltaggio di attuazione: 30  $[V_{pp}]$ . [8]

### 3.2.3.1 Prima configurazione: Tweeter + Woofer

Il primo design proposto in [8] è costituito da otto attuatori piezoelettrici ognuno di essi costituito da uno strato di piezoelettrico ed uno strato di passivazione. Gli attuatori sono disposti nel seguente modo: quattro attuatori, di forma trapezoidale sono posti all'esterno e fungono da woofer; quattro attuatori triangolari, posti su un frame interno sospeso al woofer per mezzo di molle piegate, costituiscono il tweeter internamente. Per immediatezza descrittiva si riporta la configurazione in figura 3.13:



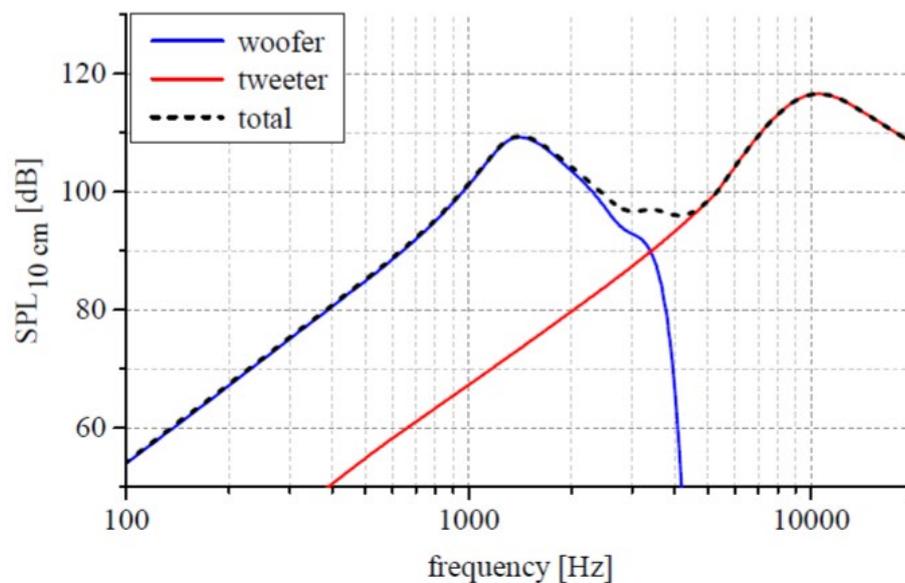
**Figura 3.13:** rappresentazione schematica (sinistra) e fotografia (destra) della configurazione del dispositivo dell'Istituto di Fraunhofer. [8]

Il dispositivo ha un'estensione di  $1 \text{ [cm}^2\text{]}$  essendo un quadrato di lato  $10 \text{ [mm]}$ . L'attuazione del microspeaker è differenziata per gli attuatori che fungono da tweeter e quelli che hanno funzione di woofer. Dal momento che gli attuatori sono fisicamente disaccoppiati l'uno dall'altro, per mezzo di fenditure larghe  $5 \text{ [}\mu\text{m]}$ , è possibile raggiungere ampiezze di deflessione molto grandi; con un'attuazione di  $30 \text{ [V}_{pp}\text{]}$  infatti, a soli  $100 \text{ [Hz]}$  si raggiungono scostamenti di circa  $400 \text{ [}\mu\text{m]}$ . Attuando separatamente il dispositivo alle alte e alle basse frequenze, oltretutto, si può avere, unitamente al fatto che l'attuazione è di tipo piezoelettrico, un'efficienza energetica molto buona.

Dall'analisi elettro-meccanica del dispositivo si ottiene che le frequenze di risonanza per le basse e le alte frequenze sono rispettivamente:  $1.5 \text{ [kHz]}$  e  $10 \text{ [kHz]}$ .

Per quanto riguarda le prestazioni acustiche, considerando tutto il dispositivo, attuando sia il woofer che il tweeter, esse sono riportate in figura 3.14. La tensione utilizzata per ottenere i dati riportati è di  $30 \text{ [V}_{pp}\text{]}$ .

Il grafico riportato presenta due picchi nella banda dell'udibile, uno per ognuna delle due frequenze di risonanza, una per le basse e una per le alte frequenze. Fra i due picchi il grafico scende fino ad un valore minimo di 96 [dB]. Al di sotto della prima frequenza di risonanza il livello di pressione sonora generato cala velocemente raggiungendo valori intorno ai 55 [dB] per una frequenza di 100 [Hz] [8].



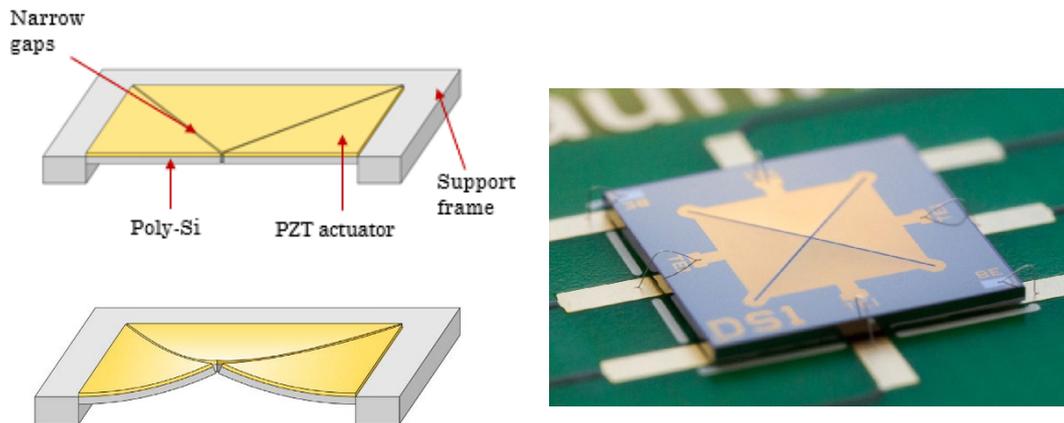
**Figura 3.14:** risposta in frequenza del dispositivo “Tweeter + Woofer” presentato in [8].

Evidenziata in rosso la curva relativa alle prestazioni del tweeter, in blu invece le prestazioni del woofer.

Nell'articolo a cui si fa riferimento non vengono riportati grafici relativi alla distorsione armonica relativa al dispositivo. Viene semplicemente considerato che, essendo le alte frequenze e le basse frequenze raggiunte da due modi del dispositivo attuati in modo completamente disaccoppiato, non appaiono modi di vibrazione di ordine superiore.

### 3.2.3.2 Seconda configurazione: Solo Tweeter [15]

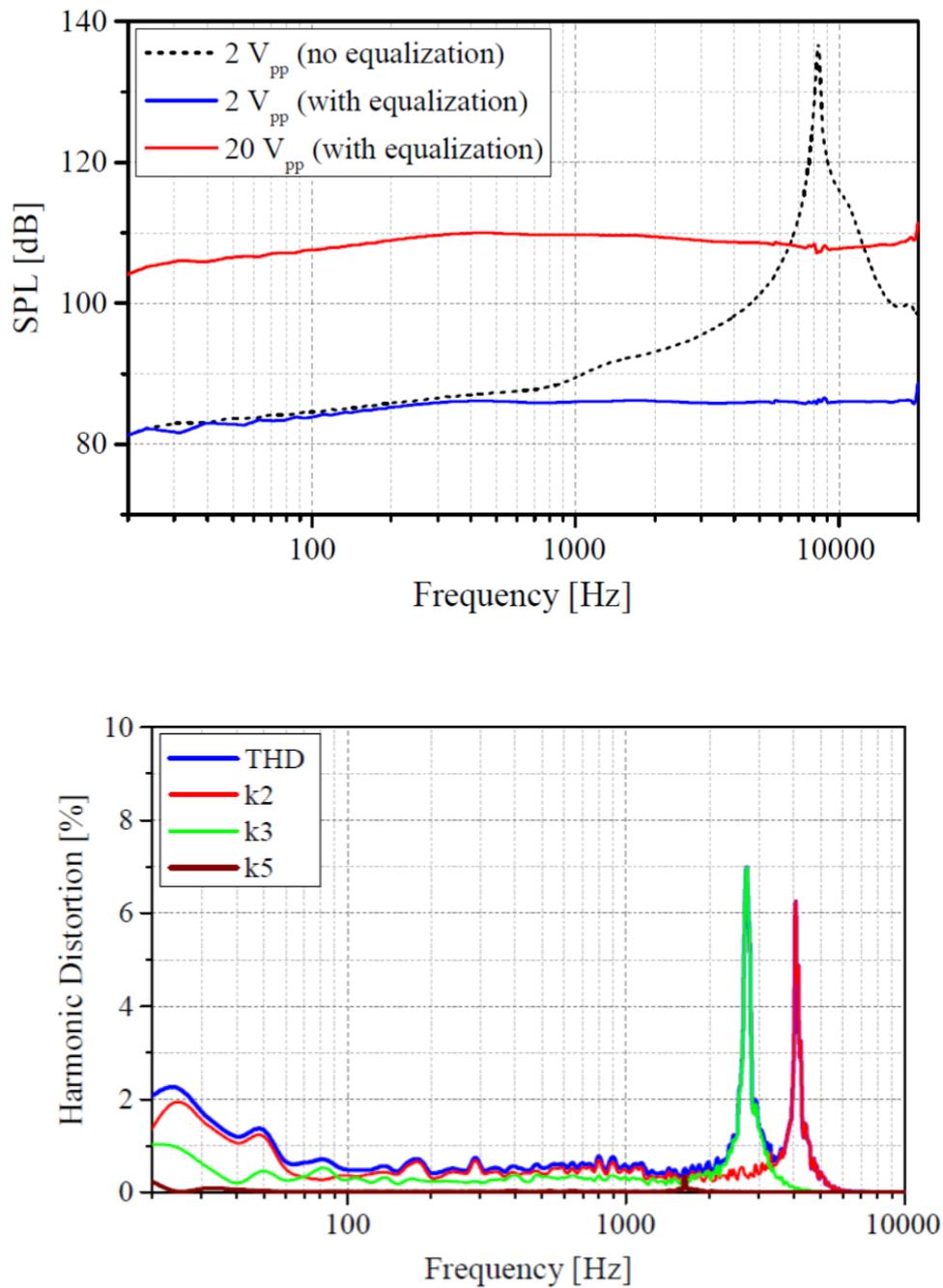
Il secondo design proposto dall'Istituto di Fraunhofer è costituito semplicemente dalla porzione centrale del dispositivo precedente, ovvero viene preso in considerazione solamente il tweeter, rappresentato in figura 3.15:



**Figura 3.15:** A sinistra una schematizzazione del dispositivo tagliato (sopra) e il principio di funzionamento sempre in sezione (sotto); a destra una fotografia del dispositivo prodotto. [15]

Questo dispositivo ha un'estensione di  $16 \text{ [mm}^2\text{]}$  e presenta, come nel caso precedente, un'attuazione di tipo piezoelettrico, fornita da uno strato di PZT spesso  $2 \text{ [}\mu\text{m]}$ . Anche in questo caso si sfrutta lo studio sulle fenditure sottili separando i petali con intagli larghi  $9 \text{ [}\mu\text{m]}$  [15].

Andando a caratterizzare le prestazioni acustiche del dispositivo una prima osservazione è che la frequenza di risonanza del microspeaker si trova a  $8.3 \text{ [kHz]}$  ed è proprio a questo valore di frequenza che la curva di risposta in frequenza assume il suo massimo come livello di pressione acustica generata,  $138 \text{ [dB]}$ , con un'attuazione di  $2 \text{ [V}_{pp}]$ . Per quanto riguarda la distorsione armonica, essa si mantiene entro il 2% su tutta la banda acustica analizzata eccetto che alla frequenza di risonanza dove raggiunge un valore del 7% [15]. I grafici relativi alle prestazioni del dispositivo sono riportati nella figura 3.16:

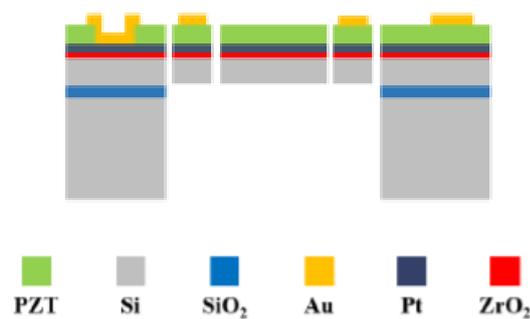


**Figura 3.16 (a,b):** Risposta in frequenza (a) e distorsione armonica (b) del tweeter ideato dai ricercatori dell'Istituto di Fraunhofer. [15]

### 3.2.4 Piezo Microspeaker ideato presso la National Tsing Hua University [9]

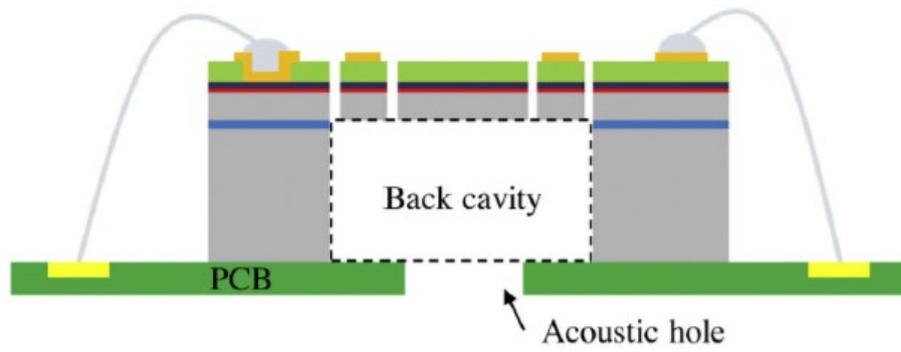
In questo paragrafo viene analizzato un microspeaker che ricalca nei tratti fondamentali, attuazione piezoelettrica e geometria con intagli sottili, il dispositivo precedentemente presentato. Sono state studiate dai ricercatori dell'Università di Taiwan diverse geometrie e configurazioni di elettrodi per cercare di massimizzare la risposta in frequenza del dispositivo. Di seguito viene fatta una descrizione generale dell'idea che è alla base di questo tipo di dispositivi, si entrerà poi nel dettaglio di ogni singola configurazione discutendone le prestazioni.

Il microspeaker considerato è costituito da una struttura multistrato che comprende, tra i vari strati che sono visibili in figura 3.17, uno strato di PZT di spessore che varia, a seconda del dispositivo, tra 1  $[\mu\text{m}]$  e 2  $[\mu\text{m}]$ .



**Figura 3.17:** Stratigrafia del microspeaker ideato presso la National Tsing Hua University. [9]

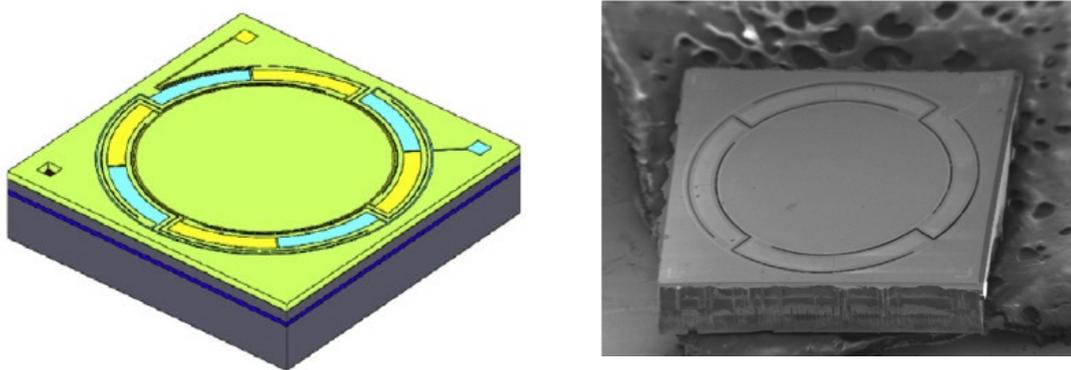
Le configurazioni proposte hanno come caratteristica comune, a livello di geometria, la presenza di un diaframma centrale sospeso da delle molle a spirale che permettono di avere una struttura cedevole che massimizzi lo spostamento della membrana lungo la direzione ortogonale al piano del diaframma mantenendo quest'ultimo piano. Inoltre, tutte e tre le configurazioni presentano una cavità acustica aperta al di sotto di esse, come riportato in figura 3.18:



**Figura 3.18:** Rappresentazione schematica del foro acustico posizionato in fondo alla cavità acustica sul retro dei dispositivi presentati in [9]

### 3.2.4.1 Prima configurazione: molle a curva singola

Questa prima configurazione presenta un diaframma centrale mobile sostenuto da quattro molle disposte intorno ad esso, come mostrato in figura 3.19. A separare le molle dal diaframma e dal sostegno esterno ci sono dei tagli che forano completamente il piano del dispositivo.



**Figura 3.19:** Microspeaker con molle a curva singola presentato in [16] nelle due versioni: a) Modellazione su software; b) Micrografia SEM.

Questa tipologia di molle è stata implementata sul dispositivo per ottenere spostamenti il più ampi possibili in modo da aumentare il volume di aria spostato dal dispositivo, e quindi migliorare l'emissione sonora del microspeaker.

Osservando in dettaglio le dimensioni del dispositivo si nota che il film di materiale piezoelettrico depositato in questa configurazione risulta essere spesso  $1\ \mu\text{m}$  e il diametro del diaframma centrale misura  $1460\ \mu\text{m}$ . Lo spessore delle fenditure a separazione degli elementi costitutivi del dispositivo ha una larghezza di  $5\ \mu\text{m}$ , il diametro della cavità che sta sotto al dispositivo è di  $1800\ \mu\text{m}$  e lo spessore delle molle curve disposte attorno al diaframma è di  $160\ \mu\text{m}$ . [16].

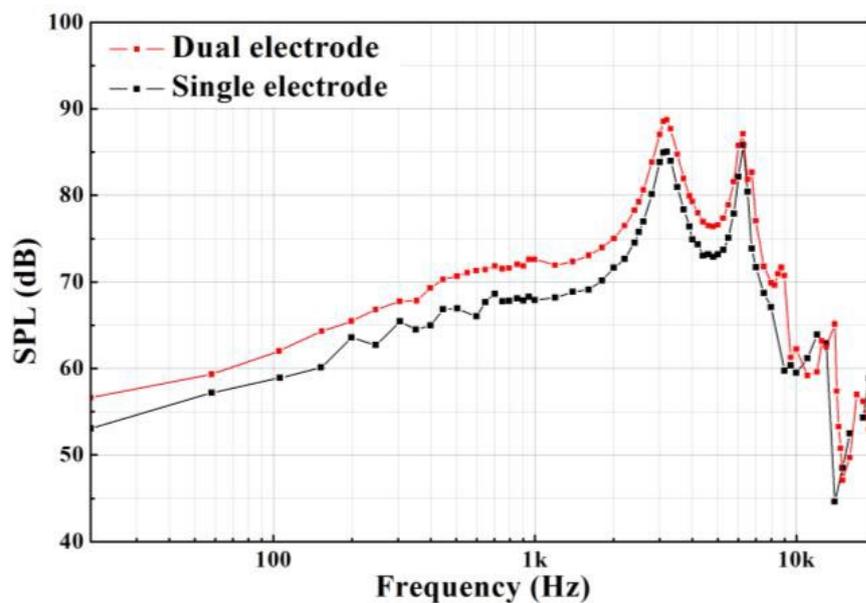
Per quanto riguarda le prestazioni di questo microspeaker, una prima considerazione fatta è quella di osservare le frequenze di risonanza dei principali modi di vibrazione della membrana. In particolare, i ricercatori dell'università di Taiwan hanno ottenuto un primo modo di risonanza della struttura a  $3.2\ \text{kHz}$  e un secondo modo (detto modo a tamburo) appena al di fuori della banda dell'udibile, a  $22.4\ \text{kHz}$ .

Un ultimo appunto riguardante il design presentato concerne la scelta, da parte degli autori, di differenziare l'attuazione di diverse zone delle molle in modo da riuscire a controllare in maniera più efficiente il modo di vibrazione a pistone del dispositivo cosicché si abbia un incremento delle prestazioni del microspeaker. (Facendo

riferimento alla figura 3.19, questa distinzione è evidenziata dalla differenza di colori, giallo e azzurro, presenti sulle singole molle curve).

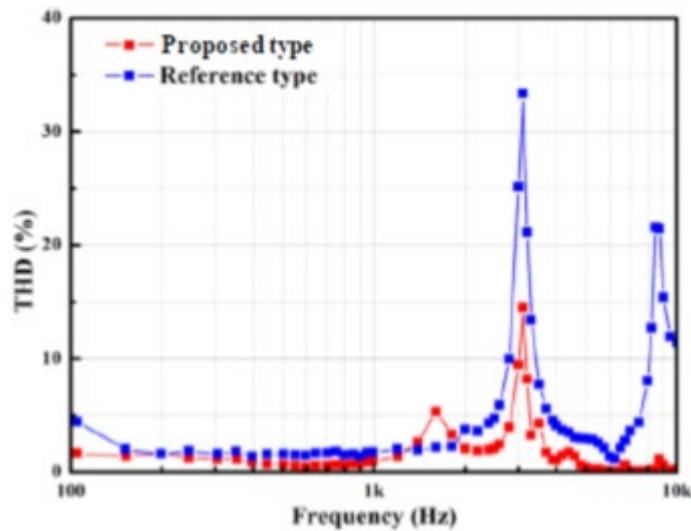
Le prestazioni di questo dispositivo sono state valutate tramite un modello agli elementi finiti. In particolare, per quanto riguarda il livello di pressione acustica generato, esso è stato calcolato tramite il software COMSOL Multiphysics accoppiando il dispositivo con un simulatore della cavità acustica.

Attuando fuori fase gli elettrodi del dispositivo con un voltaggio di 2 [V<sub>pp</sub>], tensione applicata nella maggior parte dei dispositivi elettronici, la curva di risposta in frequenza che si ottiene è quella riportata in rosso in figura 3.20, mentre l'attuazione coordinata di entrambe le tipologie di elettrodi (gialli e azzurri in figura 3.19) la curva a cui fare riferimento è quella riportata in nero.



**Figura 3.20:** Risposta in frequenza del microspeaker con molle curve ideato presso l'Università di Taiwan. [16]

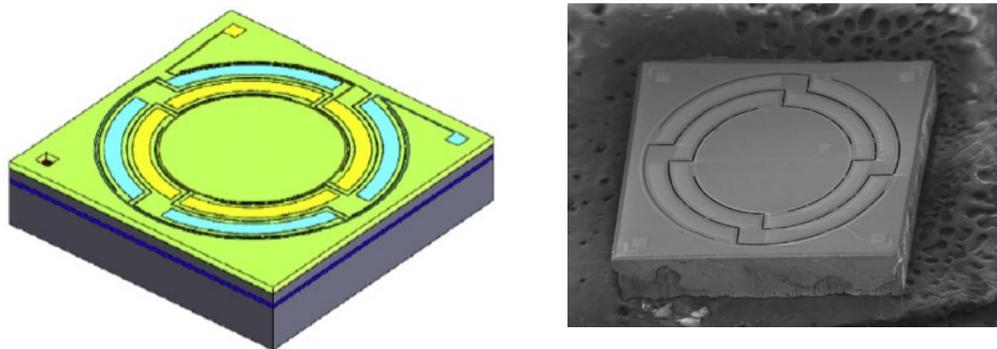
Considerando ora la distorsione armonica riportata nell'articolo relativo a questo dispositivo, rappresentata come curva rossa in figura 3.21, si può notare che il livello di THD relativo al microspeaker risulta essere molto basso, intorno al 2%, su tutta la banda di suoni presentata (0-10 [kHz]) ad eccezione di quando si è in prossimità del picco di risonanza a 3,2 [kHz] e al picco relativo alla prima sub armonica della risonanza (1.6 [kHz]). In questi due casi la distorsione raggiunge livelli del 5/15%. [16].



**Figura 3.21:** Grafico della distorsione armonica relativa al dispositivo studiato nel paragrafo. [16]

### 3.2.4.2 Seconda configurazione: molle a curva doppia

In questa seconda configurazione, proposta in [17] dai ricercatori della National Tsing Hua University, la struttura rimane pressoché invariata dal punto di vista del funzionamento, semplicemente viene modificata la geometria delle molle che sostengono il diaframma. Come possibile notare in figura 3.22, infatti, queste ultime non hanno più solamente una curvatura, ma assumono una forma più complessa, che tentativamente dovrebbe fornire maggior flessibilità al diaframma centrale.



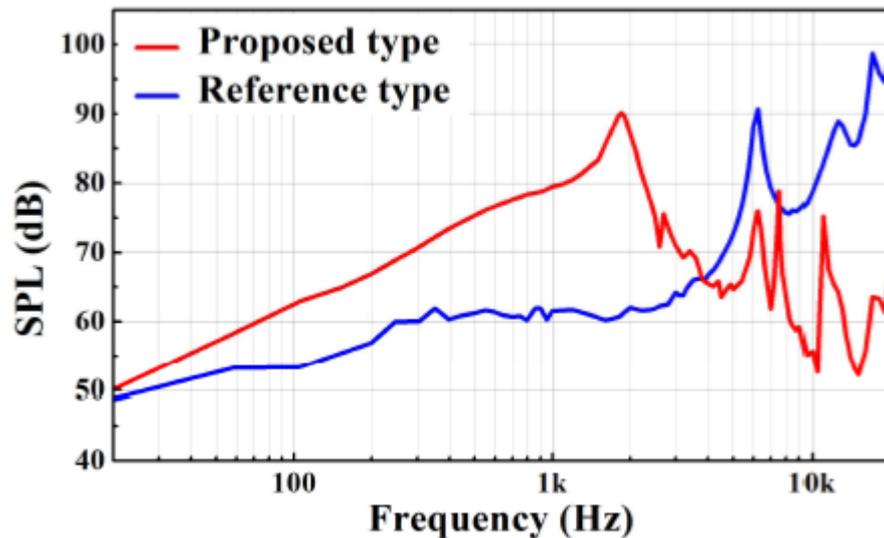
**Figura 3.22:** Microspeaker con molle a curva doppia presentato in [17] nelle due versioni: a) Modellazione su software; b) Micrografia SEM.

Per migliorare il livello di pressione sonora emessa alle basse frequenze, questo lavoro propone una struttura con molle più lunghe ma con lo stesso fattore di forma rispetto a quelle presenti nella prima tipologia presentata al paragrafo precedente. La struttura di questo dispositivo viene realizzata con una nuova molla a spirale integrata con il precedente concetto di elettrodi differenziati.

L'unica dimensione che cambia nella realizzazione del dispositivo che si sta descrivendo rispetto a quello precedentemente mostrato, è l'area del diaframma che sposta il volume d'aria che nel caso precedente risultava di  $1,67 \text{ [mm}^2\text{]}$ , in questo caso misura  $1 \text{ [mm}^2\text{]}$ . Per il resto in questo dispositivo vengono mantenute le stesse dimensioni del dispositivo precedente, per cui lo spessore di PZT depositato anche in questo caso risulta essere pari a  $1 \text{ [}\mu\text{m]}$ , come anche le fenditure di separazione tra molle e diaframma rimangono larghe  $5 \text{ [}\mu\text{m]}$ . [17].

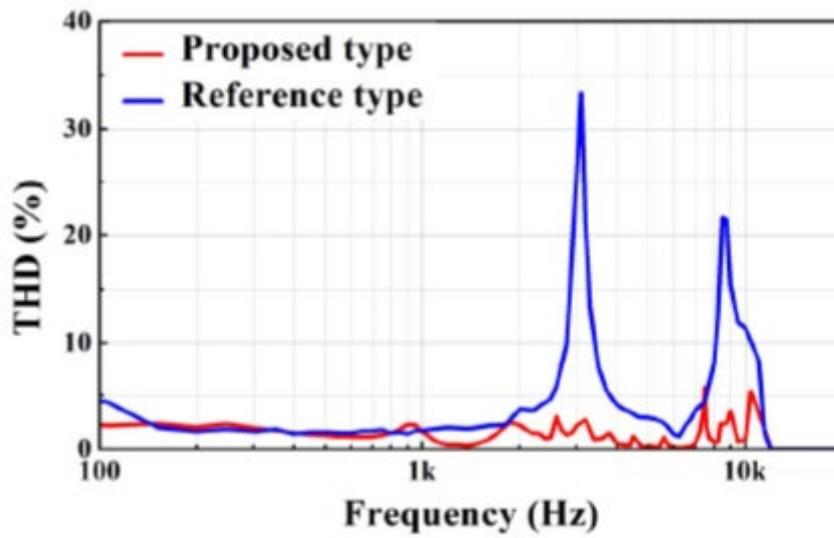
La prima frequenza di risonanza presente in questo dispositivo si trova a  $1.85 \text{ [kHz]}$ . Come nel precedente caso le prestazioni del dispositivo sono dapprima state verificate su un software e in seguito è stato prodotto un prototipo. Si analizzano ora i dati raccolti presso l'università di Taiwan dalla simulazione a computer del modello che si sta presentando.

Per quanto riguarda la risposta in frequenza del dispositivo, attuando fuori fase gli elettrodi del dispositivo con un voltaggio di 2 [V<sub>pp</sub>], si ottiene la curva di risposta in frequenza riportata in rosso in figura 3.23, mentre la curva blu presente nell'immagine si riferisce ad un ipotetico modello di riferimento costituito da una membrana completamente chiusa, attuata anch'essa con elettrodi alternati. [17].



**Figura 3.23:** Grafico della risposta in frequenza del dispositivo presentato in [17] con molle a spirale ed elettrodi differenziati. In blu la curva che si riferisce al dispositivo di riferimento, in rosso la curva relativa al dispositivo presentato.

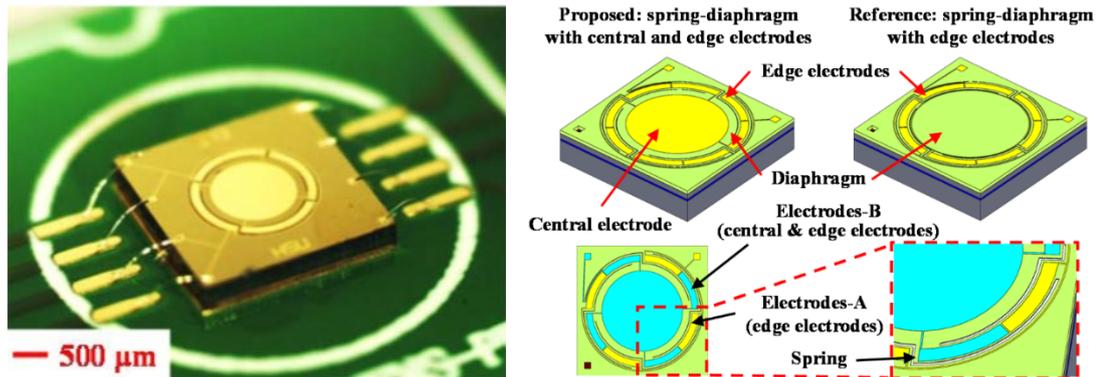
Passando all'analisi della distorsione armonica generata dal dispositivo nel segnale in uscita da esso, si può notare dalla curva presentata in figura 3.24 che il livello di THD risulta migliorato rispetto alla configurazione precedente in quanto risulta essere molto basso su tutta la banda dei suoni emessi dal dispositivo, non andando mai oltre al 6%.



**Figura 3.24:** Grafico della distorsione armonica totale del dispositivo con molle a spirale ed elettrodi differenziati. In rosso la curva relativa alla distorsione del dispositivo presentato nel paragrafo. [17]

### 3.2.4.3 Terza configurazione: molle a curva singola con elettrodo centrale

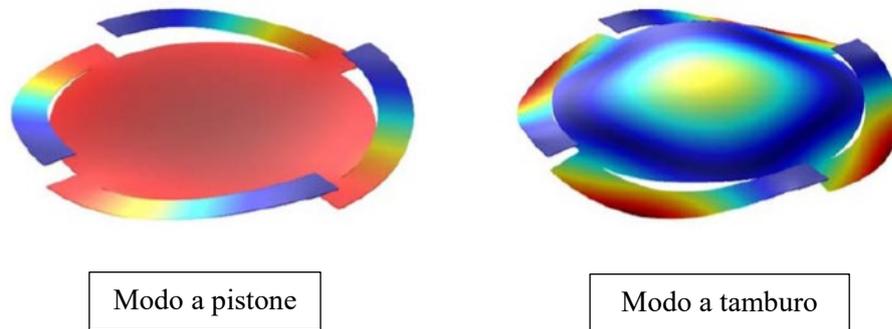
Nella terza configurazione proposta in [18] viene ripresa la prima struttura, modificata inserendo un elettrodo anche nella parte centrale del dispositivo cosicché anche il PZT presente in questa zona venga attivato e dia il suo contributo alla generazione di una maggiore SPL.



**Figura 3.25:** Terza tipologia di dispositivo, configurazione che prevede molle a curva singola e presenza di un elettrodo centrale. [18]

Le dimensioni del dispositivo coincidono con quelle del primo microspeaker presentato, per cui in questo caso si torna ad avere una superficie del diaframma mobile di  $1,67 \text{ [mm}^2\text{]}$ . Viene modificata la stratigrafia del dispositivo in quanto il piezoelettrico risulta essere spesso  $2 \text{ [}\mu\text{m]}$  a differenza dei casi precedentemente presentati [18].

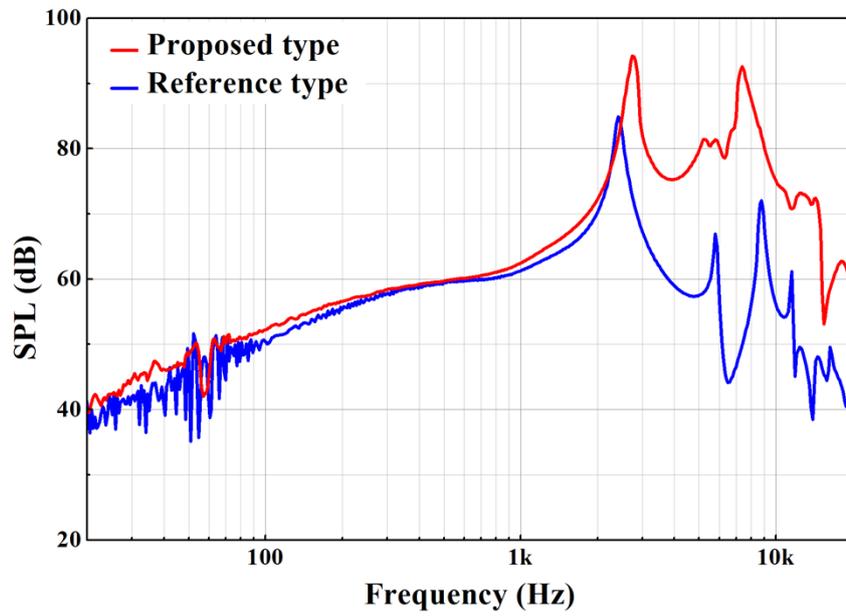
La presenza dell'elettrodo centrale favorisce l'avvicinamento nel campo delle frequenze del modo a tamburo che nel modello di riferimento era stato valutato a  $22,4 \text{ [kHz]}$ . Nel presente studio, invece, viene riportato che il modo a tamburo, la cui attuazione risulta facilitata dalla presenza dell'elettrodo centrale, si trova ad una frequenza di circa  $10 \text{ [kHz]}$ , quindi pienamente nella banda dell'udibile. Il modo a pistone, attuato dagli elettrodi disposti sulle molle che sostengono il diaframma, si ritrova a  $2,4 \text{ [kHz]}$ . Per rendere un'idea qualitativa dei modi di vibrazione di cui si sta parlando, vengono riportati nella seguente figura:



**Figura 3.26:** Modi di vibrazione del dispositivo: a sinistra il modo a pistone, situato a 2,4 [kHz]; a destra il modo a tamburo, situato a 10 [kHz]. [18]

Passando alla caratterizzazione del dispositivo in termini di prestazioni, si è osservato che per quanto riguarda la risposta in frequenza, quest'ultima è nettamente migliorata dalla presenza dell'elettrodo centrale rispetto alla configurazione di riferimento in cui non è presente. Infatti, a parità di attuazione ( $2 [V_{pp}]$ ), nella banda che si estende dai 2,6 [kHz] fino ai 20 [kHz] si ha un incremento omogeneo di circa 15 [dB] del livello di pressione acustica generato, con un picco che arriva fino a 94.2 [dB]. Il grafico che mostra questo andamento è riportato in figura 3.27 in cui viene evidenziata in rosso la curva relativa al dispositivo con elettrodo centrale e in blu la curva del dispositivo di riferimento [18].

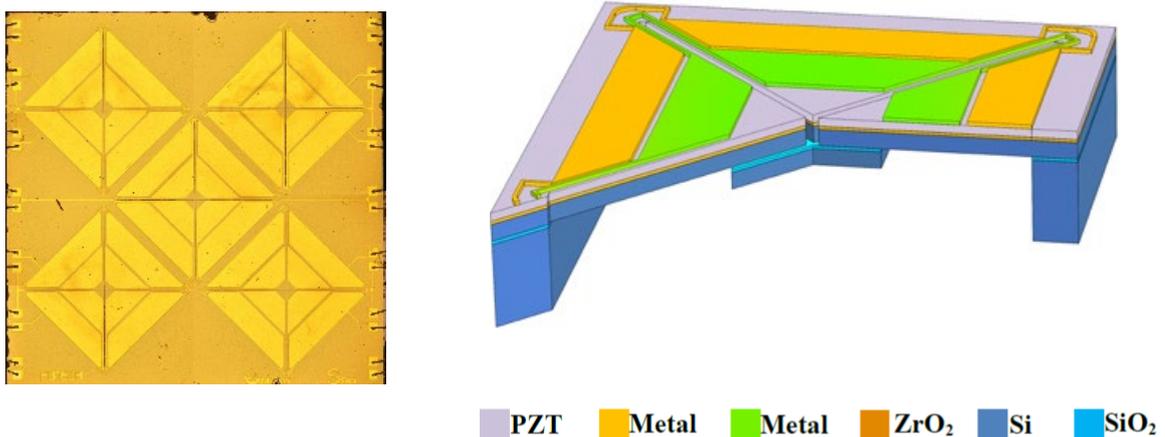
Purtroppo, nel lavoro presentato, non si fa riferimento a curve che riportino la distorsione armonica generata nel segnale in uscita dal dispositivo, per cui non è possibile confrontare con completezza le prestazioni di questo dispositivo con quelle dei precedenti.



**Figura 3.27:** risposta in frequenza del dispositivo con elettrodo centrale (in rosso) confrontata con una curva di riferimento. [18]

### 3.2.4.4 Quarta configurazione: array di cinque microspeakers

Un'ultima configurazione proposta dai ricercatori dell'Università di Taiwan differisce notevolmente dalle precedenti, presentando un completo cambiamento di geometria e l'idea innovativa di accostare più dispositivi in modo da riuscire a spostare un maggior volume d'aria, incrementando così il livello di pressione acustica generato.



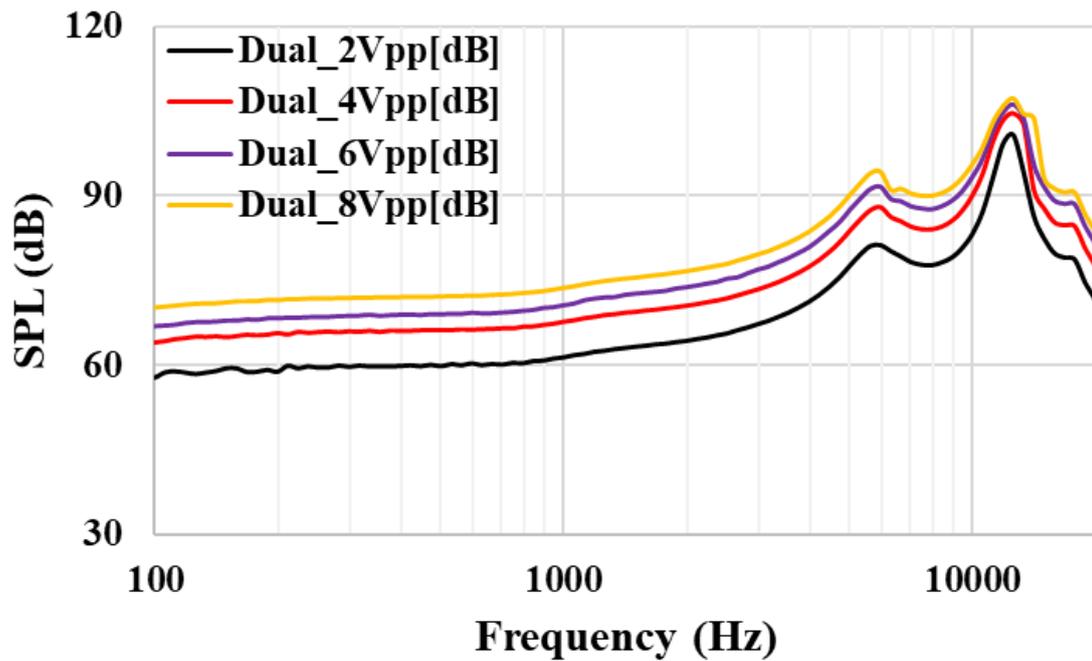
**Figura 3.28:** A sinistra una micrografia dell'array di dispositivi presentato; a destra una modellazione del singolo elemento che compone l'array. [19]

Il singolo microspeaker, che insieme ad altri quattro dispositivi identici costituisce l'array, è formato da quattro attuatori triangolari collegati al centro da una massa di connessione e attuati da elettrodi duali. Il ruolo della massa di connessione è quello di sincronizzare il movimento dei diversi "petali" del dispositivo evitando anche un incremento della larghezza delle fenditure durante il movimento.

Il singolo microspeaker presenta un'estensione superficiale di 13 [mm<sup>2</sup>]. Come nel precedente dispositivo lo spessore dello strato di piezoelettrico è di 2 [μm] e il dispositivo finale presenta un foro acustico sul fondo della cavità sottostante al diaframma. Infine, anche in questo caso si fa utilizzo di un'attuazione differenziata in diverse zone degli attuatori che, come già visto in precedenza, permette un maggior controllo sull'attuazione favorendo un incremento del livello di pressione acustica generata [19].

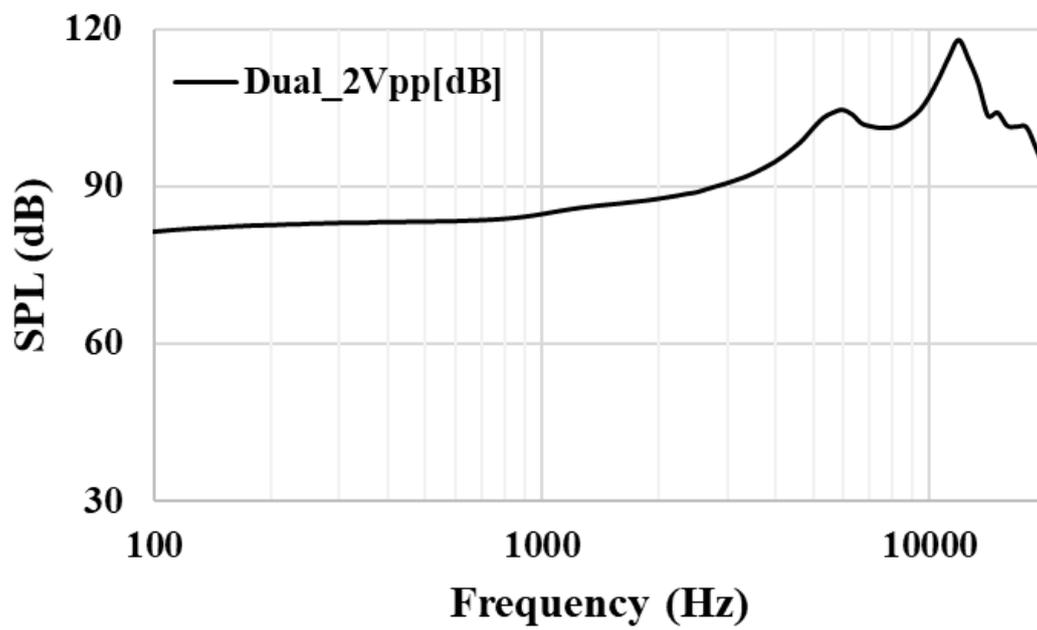
Di seguito, in figura 3.29 e figura 3.30, vengono presentate le prestazioni del dispositivo a livello di risposta in frequenza, in quanto non vengono fornite informazioni riguardanti la distorsione armonica. L'attuazione, durante la sperimentazione, è stata fatta variare da 2 [V<sub>pp</sub>] fino ad 8 [V<sub>pp</sub>] per quanto riguarda il singolo microspeaker; per il dispositivo completo, array di 5 microspeakers, l'attuazione è avvenuta per mezzo di una tensione di 2 [V<sub>pp</sub>]. In tutti e due i casi gli

attuatori interni ed esterni (evidenziati rispettivamente in verde ed in giallo in figura 3.28) sono stati attuati con uno sfasamento di  $180^\circ$  così da stimolare il modo a pistone, incrementando gli SPL generati [19].



**Figura 3.29:** Curva di risposta in frequenza per il singolo microspeaker attuato con 2,4,6,8 [V<sub>pp</sub>]. [19]

Si osserva che il livello di pressione acustica generato aumenta notevolmente nel caso dell'array di microspeakers. Questo risultato era prevedibile dal momento che aumenta il volume d'aria spostato. Il picco di emissione si ha poco sopra i 10 [kHz], per cui a frequenze molto alte, dove si raggiungono i 120 [dB].

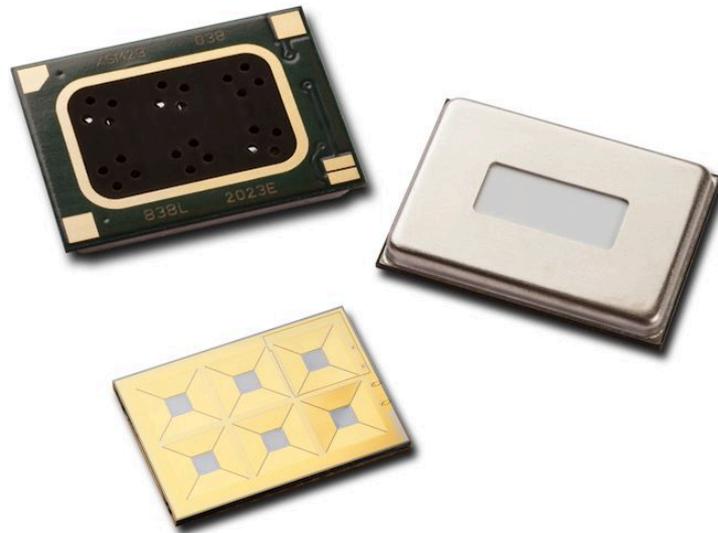


**Figura 3.30:** Curva di risposta in frequenza dell'intero dispositivo attuato a 2 [V<sub>pp</sub>]. [19]

### 3.2.5 Piezo microspeaker ideato dalla compagnia xMEMS:

Nel presente paragrafo si riporta la descrizione del dispositivo “Montara” ideato dai ricercatori della compagnia xMEMS [20]. Dal momento che tale microspeaker sarà disponibile sul mercato solo a partire dal 2021, per mancanza di documentazione tecnica la caratterizzazione sarà sommaria.

Fondamentalmente anche questo dispositivo è ad attuazione piezoelettrica e la caratteristica per cui differisce da quelli precedentemente presentati è il fatto che sia ideato non come singolo device, ma come array di sei dispositivi, come mostrato nella seguente figura:



**Figura 3.31:** Dispositivo “Montara” ideato dalla compagnia xMEMS. [20]

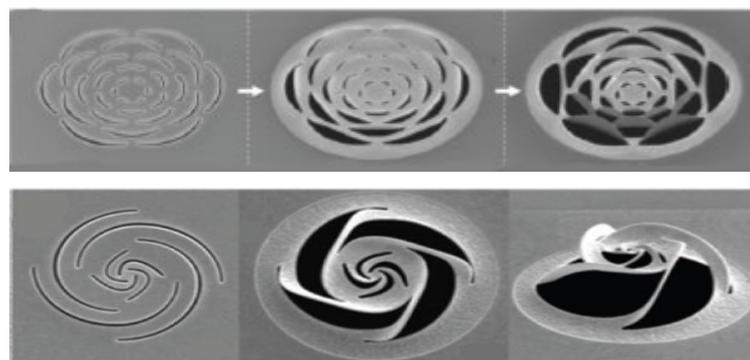
Le dimensioni del dispositivo, dichiarate sul sito del produttore, sono di circa 50 [mm<sup>3</sup>] di volume con uno spessore della struttura inferiore ad 1 [mm].

L’attuazione a cui sono riportati i dati è di 30 [V<sub>pp</sub>]. Per questa differenza di potenziale applicata il dispositivo risulta avere una risposta in frequenza piatta intorno ai 115 [dB] su tutta la banda dell’udibile, con livelli di distorsione armonica intorno allo 0,5%. [20].

### 3.3 Kirigami: esempio dal mondo MEMS

In questa sezione si illustra brevemente il mondo dei kirigami e come lo sviluppo di nuovi design per sistemi micro-elettro-meccanici possa essere ispirato da questa tecnica. Nei seguenti paragrafi si fa riferimento ad elaborati in cui è stata verificata la fattibilità dello sviluppo di MEMS basati su questa tecnica. Si è deciso di introdurre questa breve sezione in quanto anche nell'ideazione di nuove configurazioni di microspeakers ci si è ispirati ai kirigami.

I kirigami, parola derivante dai sostantivi giapponesi “kiri” che significa “tagliare” e “kami” che significa “carta”, sono una tecnica orientale che prevede il taglio e la piegatura, solitamente di carta o cartoncini, per ottenere, a partire da un foglio, quindi una struttura bidimensionale, una geometria tridimensionale. Oltre all'interesse che suscitano in ambito artistico e architettonico i kirigami hanno attirato anche l'interesse di altri ambiti come, ad esempio, la costruzione di strutture micro-elettro-meccaniche. Il problema principale nella realizzazione di microdispositivi ispirati a questa tecnica è la realizzazione di intagli di piccola dimensione. Per fare questi ultimi, infatti, si utilizza la tecnica FIB (focused ion beam) che risulta però generalmente avere diversi svantaggi quali la creazione di sforzi residui sul materiale che viene inciso e l'impianto di specie chimiche utilizzate nell'operazione di taglio (solitamente ioni di Gallio). Nel caso specifico di strutture che devono flettersi, però, questi ultimi, che sono di norma considerati effetti non desiderati, risultano essere d'aiuto nella fase di piegatura del dispositivo. Infatti, lo stato di sforzo generato nel materiale, costituito sia da zone di compressione che da zone di trazione, permette il naturale imbarcamento delle strutture che, dalla loro configurazione planare di partenza, si deformano dando origine alla struttura tridimensionale. Nelle figure seguenti si presentano alcune micrografie di kirigami prodotti alla micro-scala [21].

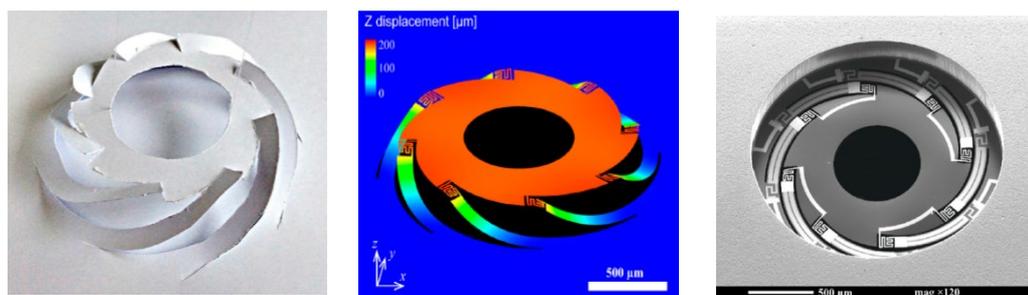


**Figura 3.32:** Esempi di microstrutture, ispirate alla tecnica dei kirigami, deformate dalla presenza di sforzi residui. [21]

Come già riportato introducendo la sezione, sono già numerosi i casi di sistemi micro-elettro-meccanici ispirati al mondo dei kirigami. Di seguito viene presentato un esempio che dimostra la fattibilità di strutture ispirate a questa tecnica orientale e che ricorda anche una delle configurazioni presenti nello stato dell'arte per quanto riguarda i microspeakers.

Nel lavoro riportato si è studiata la realizzazione di uno scanner MEMS ad attuazione elettro-termica che per il funzionamento richiede grandi spostamenti nella direzione ortogonale al piano su cui giace il dispositivo. Nella realizzazione del dispositivo si è utilizzata per la formazione degli intagli, la tecnica RIE, valida alternativa alla FIB vista in precedenza. Nella realizzazione delle strutture che permettono la sospensione del diaframma si sono allineati gli intagli e gli elettrodi termici bimorfi in modo da massimizzare lo scostamento della struttura quando attuata. L'attuazione di tale dispositivo avviene per mezzo del riscaldamento prodotto dall'effetto Joule al passaggio della corrente e il dispositivo viene riportato nella sua configurazione iniziale per mezzo di raffreddamento naturale. Per creare la struttura sono stati anche sfruttati gli sforzi residui che determinano la disposizione spaziale iniziale del diaframma centrale [22].

In figura vengono presentati i tre passaggi fondamentali per la realizzazione di questo dispositivo: l'ideazione e conseguente realizzazione di un modello di kirigami in carta, la modellazione del dispositivo tramite software e infine la produzione del dispositivo vero e proprio.



**Figura 3.33:** da sinistra a destra: kirigami in carta; dispositivo modellato a computer; dispositivo realizzato. [22]

Lo studio riporta ottime prestazioni del dispositivo e quindi testimonia la fattibilità dell'applicazione e realizzazione dei concetti dei kirigami anche nella microfabbricazione. Per questo motivo si è fatto riferimento a questa tecnica durante l'ideazione di nuove configurazioni di microspeakers.



# 4

## PIEZOELETTTRICITÀ E ACUSTICA

### 4.1 Piezoelettricità

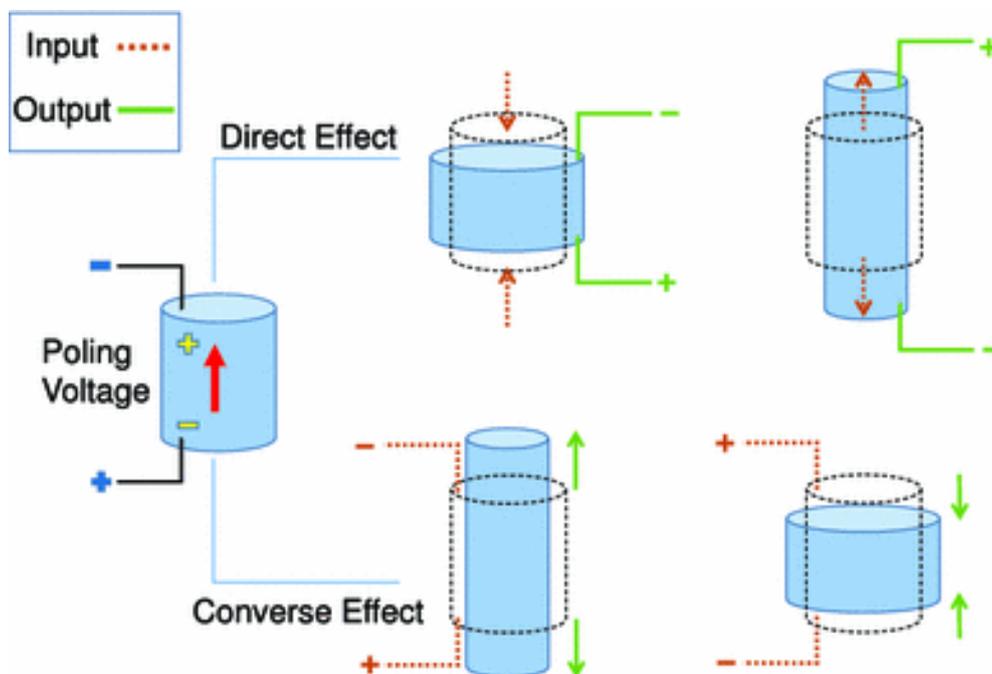
In questo capitolo si ripercorrono i concetti fondamentali della piezoelettricità delineando il formalismo matematico che la descrive.

I materiali piezoelettrici sono una classe di materiali dielettrici, cioè materiali elettricamente isolanti che, però, possono esibire una separazione di carica al loro interno a livello molecolare o atomico. La particolarità di questi materiali è che possono essere polarizzati, oltre che attraverso un campo elettrico, per mezzo dell'applicazione di uno sforzo meccanico. Questa particolare proprietà prende il nome di piezoelettricità. Questa categoria di materiali può essere suddivisa in due sottocategorie: materiali piezoelettrici polarizzati, cioè materiali che possiedono un momento di dipolo netto, e materiali piezoelettrici non polarizzati, i cui momenti di dipolo nelle varie direzioni, se sommati, danno una risultante nulla [23].

La ragione per cui i materiali piezoelettrici generano una differenza di potenziale è che quando viene applicato uno sforzo meccanico su di essi la struttura cristallina viene modificata cambiando così anche la distribuzione dei dipoli all'interno del materiale. Questo fenomeno può avvenire sia nel caso in cui i dipoli indotti all'interno del materiale piezoelettrico siano dati da ioni sia che siano costituiti da gruppi molecolari. Nel primo caso si ha una riconfigurazione degli ioni all'interno del reticolo cristallino, nel secondo caso un riorientamento dei gruppi molecolari.

Si possono distinguere due diversi meccanismi esibiti dai materiali piezoelettrici che sono l'effetto piezoelettrico diretto e l'effetto piezoelettrico inverso.

Nel caso dell'effetto piezoelettrico diretto, caso a cui si è fatto riferimento fino ad ora nella descrizione, la sollecitazione che viene fornita al materiale è di tipo meccanico, per cui il materiale, sollecitato da uno sforzo esterno, modifica la propria struttura generando una differenza di potenziale. Per quanto riguarda l'effetto piezoelettrico inverso, invece, lo stimolo che viene fornito al materiale è di tipo elettrico. Solitamente il materiale è sottoposto ad una differenza di potenziale che causa una modifica nella struttura cristallina, conseguentemente il piezoelettrico si deforma, traducendo quindi l'energia da elettrica a meccanica (figura 4.1).



**Figura 4.1:** Schema riassuntivo di effetto piezoelettrico diretto ed effetto piezoelettrico inverso. [29]

Il materiale piezoelettrico più utilizzato per l'attuazione di sistemi micro-elettromeccanici è il PZT, piombo zirconato titanato, date le sue ottime proprietà di traduzione del segnale elettrico in energia meccanica.

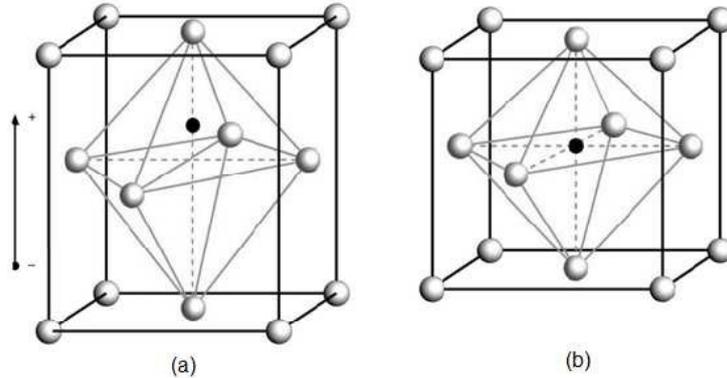


Figura 4.2: Struttura cristallina del PZT. [30]

#### 4.1.1 Descrizione matematica delle proprietà piezoelettriche

Questa sezione presenta la descrizione matematica delle proprietà piezoelettriche assumendo la teoria lineare, che suppone un andamento lineare per la risposta piezoelettrica in presenza di campi elettrici e sforzi meccanici di piccola entità. Il formalismo matematico che descrive le proprietà piezoelettriche di un materiale si basa su equazioni che governano diversi problemi: il problema elastico, il problema elettrostatico e infine le relazioni costitutive che modellano il comportamento dei materiali presi in esame. La descrizione che segue ripercorre i passaggi presenti nell'elaborato [24]

Il sistema a cui si fa riferimento nella seguente trattazione è costituito da un generico volume solido  $\Omega$  con superficie esterna  $\Gamma$  su cui vengono applicate delle forze di volume e di superficie esterne, rispettivamente:  $F_i$  e  $f_i$ . In un primo momento si considerano le relazioni che governano il problema elastico. Andando a scrivere l'equazione che definisce l'equilibrio dinamico e la condizione di compatibilità lineare sono espressi dalle seguenti relazioni:

$$T_{ij,j} + F_i = \rho_m \ddot{u}_i \quad \text{in } \Omega, \quad T_{ij,j} n_j = f_i \quad \text{on } \Gamma_F, \quad [4.1 - a,b]$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{in } \Omega, \quad u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } \Gamma_U \quad [4.2 - a,b]$$

Nelle espressioni scritte sopra si ha che  $T_{ij}$  è il tensore degli sforzi,  $\rho_m$  è la densità del materiale,  $u_i$  le componenti del vettore spostamento e  $\ddot{u}_i$  sono le componenti del vettore accelerazione. Le condizioni al contorno statiche sulla frontiera del dominio

considerato mettono in relazione le forze superficiali applicate con il vettore di sforzo sulla superficie esterna.

L'equazione di compatibilità mette in relazione le componenti del tensore di deformazione  $S_{ij}$  con la parte simmetrica del gradiente degli spostamenti. Nella condizione al contorno relativa a questa equazione possiamo osservare che vengono imposti dei valori definiti alle componenti di spostamento sulla frontiera del dominio.

In secondo luogo, sono presentate le equazioni che governano la parte elettrostatica del problema. Le relazioni sono analoghe a quelle valide per la formulazione del problema elastico, si hanno per cui due equazioni: l'equilibrio elettrostatico e la compatibilità elettrostatica, entrambe valide sul volume  $\Omega$  e rispettivamente applicate anche sulle frontiere  $\Gamma_{qc}$  e  $\Gamma_{\phi}$ .

$$D_{i,i} - \rho_c = 0, \quad \text{in } \Omega; \quad D_i n_i = -q_c \quad \text{on } \Gamma_{qc}, \quad [4.3 - a,b]$$

$$E_i = \Phi_{,i}, \quad \text{in } \Omega; \quad \Phi = \bar{\Phi} \quad \text{on } \Gamma_{\phi}. \quad [4.4 - a,b]$$

In queste equazioni " $D_i$ " rappresenta le componenti del vettore di spostamento elettrico mentre  $\rho_c$  è la densità di carica elettrica nel volume. Dalle condizioni al contorno si nota che viene imposta una certa distribuzione superficiale di carica  $q_c$  sulla frontiera  $\Gamma_{qc}$ . Per quanto riguarda la compatibilità elettrica si osserva che l'equazione mette in relazione il vettore del campo elettrico  $E_i$  ad un potenziale scalare denominato  $\Phi_i$ . Anche in questo caso la condizione al contorno, analogamente a quanto visto per il caso della compatibilità elastica, assegna un valore ben definito del potenziale elettrico sulla barriera  $\Gamma_{qc}$ . Infine, per completare la descrizione delle equazioni che governano il problema, si devono considerare le relazioni costitutive del materiale. Queste relazioni tengono conto dell'accoppiamento elettro-meccanico dovuto all'effetto piezoelettrico:

$$T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} - e_{mij} E_m, \quad D_i = e_{ijk} S_{jk} + \epsilon_{ij}^S E_j \quad [4.5 - a,b]$$

La prima relazione esprime la legge costitutiva lineare elastica per il volume di materiale  $\Omega$  con l'aggiunta di un termine di accoppiamento dovuto all'effetto piezoelettrico. In questa equazione il termine  $C_{ijkl}$  è il tensore elastico del materiale mentre  $e_{mij}$  è il tensore di accoppiamento piezoelettrico.

Per quanto riguarda la seconda relazione, essa esprime l'equazione costitutiva elettrica. In questa equazione i termini presenti a moltiplicare il tensore degli sforzi e il tensore

del campo elettrico sono il tensore di accoppiamento piezoelettrico  $e_{ijk}$  e le costanti dielettriche del materiale  $\epsilon$ .

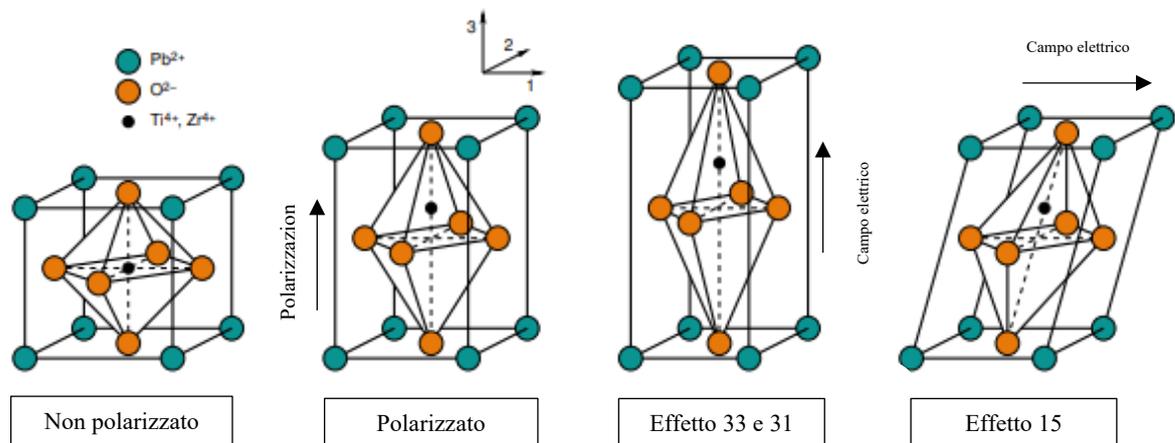
Le ultime due equazioni scritte descrivono completamente il problema piezoelettrico e costituiscono la cosiddetta formulazione “sforzo-carica” anche nota come “*e-form*”. Dal momento che questa formulazione risulta essere non simmetrica e quindi non immediata per il calcolo delle costanti piezoelettriche, si preferisce porre il problema nella formulazione “deformazione-carica”, anche noto come “*d-form*”. Passando allo stesso tempo ad una forma matriciale delle equazioni, si ottiene la seguente formulazione:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{d}^t \\ \mathbf{d} & \boldsymbol{\epsilon}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix} \quad [4.6]$$

In questa forma  $\mathbf{a}$  e  $\boldsymbol{\epsilon}$  sono la matrice elastica e la matrice dielettrica. L'accoppiamento piezoelettrico è espresso dalla matrice  $\mathbf{d}$  che è una matrice non simmetrica (3x6). I coefficienti contenuti nella matrice  $\mathbf{d}$  sono le costanti di carica piezoelettrica e sono non nulle solo nella direzione di polarizzazione del materiale piezoelettrico e sul piano ortogonale a tale direzione.

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [4.7]$$

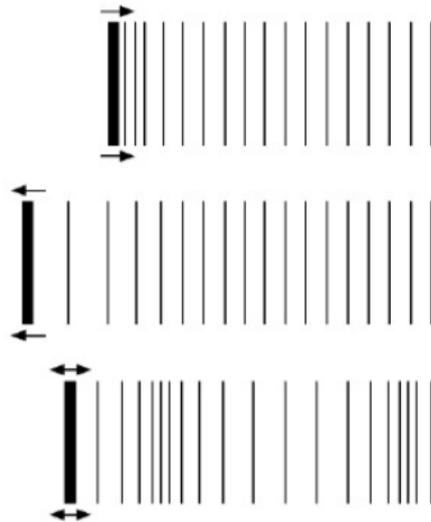
Considerando come direzione di polarizzazione del materiale la direzione 3, si distinguono tre effetti principali nel materiale: effetto 31, effetto 33, effetto 15. Per quanto riguarda l'effetto “33” questo si manifesta quando il campo elettrico applicato è concorde, come direzione, alla polarizzazione del materiale e allo stesso tempo la deformazione del materiale che viene utilizzata risulta essere nella medesima direzione. I generatori piezoelettrici sfruttano rispettivamente il coefficiente  $d_{33}$  della matrice di carica piezoelettrica del materiale se si basano su una deformazione applicata perpendicolarmente agli elettrodi, il coefficiente  $d_{31}$  se si basano su una deformazione trasversale parallela agli elettrodi. Tipicamente, nel caso di film di materiale piezoelettrico o di elementi piezoelettrici incollati su dei substrati, come nel caso dei microspeakers, l'accoppiamento è lungo la direzione trasversale ( $d_{31}$ ). Infine, l'effetto “15” è attuato dall'applicazione di un campo elettrico in una direzione perpendicolare alla direzione di polarizzazione del materiale e risulta nello scorrimento del volume piezoelettrico. [25]



**Figura 4.3:** Reticolo cristallino del PZT nelle diverse configurazioni presentate nel testo. Da sinistra a destra: reticolo non polarizzato, reticolo polarizzato, effetto 31 o 33, effetto 15. [28]

## 4.2 Acustica

Vengono presentati in questo paragrafo gli aspetti fondamentali dell'acustica di pressione in quanto indispensabili per l'impostazione del problema relativo all'emissione acustica dei microspeakers. Le onde acustiche consistono in piccole fluttuazioni di pressione che si propagano all'interno di un fluido comprimibile come variazione di densità del fluido che genera regioni di compressione e di rarefazione.



**Figura 4.4:** Schematizzazione della generazione di un'onda acustica con formazione di zone di compressione e zone di rarefazione dell'aria. [25]

Questi campi di pressione sono generati dal rapido movimento (vibrazione) di un qualsiasi corpo; nel caso dei microspeakers la vibrazione appartiene alla membrana che è attuata da una determinata tensione. L'energia sonora, quindi, è un'energia meccanica (o cinematica) che, partendo dalla sorgente, si irradia sotto forma di onde attraverso il mezzo di propagazione fino all'ascoltatore, senza trasporto di materia. Un parametro fondamentale nella descrizione dell'acustica classica è la frequenza, cioè il numero di oscillazioni che si verificano in un certo tempo di riferimento. La frequenza si misura in "Hertz" [Hz]. Le frequenze udibili dall'essere umano, dette "banda dell'udibile", vanno dagli 0 [Hz] fino ai 20 [kHz].

In quanto di natura ondulatoria anche la perturbazione acustica è soggetta ai fenomeni classici delle onde per cui: riflessione, trasmissione, assorbimento, dispersione e diffrazione. [25]

### 4.2.1 Descrizione matematica dell'acustica classica

La presente descrizione ricalca i passaggi della formulazione del problema presenti nell'elaborato: [26]. Consideriamo un volume di fluido semplice non dissipativo  $\Omega$  con densità volumica  $\rho$ , che si muove con una certa velocità  $v$  e non soggetto ad alcuna forza e fonte di calore. In tal caso valgono le leggi di conservazione della massa, del momento lineare e dell'energia in tutto il volume  $\Omega$ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad [4.8 \text{ a}]$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) + \nabla p = 0 \quad [4.8 \text{ b}]$$

$$T \rho \left( \frac{\partial s}{\partial t} + v \cdot \nabla s \right) = 0 \quad [4.8 \text{ c}]$$

In cui “t” è il tempo, “p” la pressione acustica, “T” la temperatura ed “s” l'entropia specifica del sistema.

Si passa poi alla linearizzazione delle equazioni considerando l'intorno dello stato omogeneo di riferimento:

$$\rho^0 = \text{cost}, v = 0, p^0 = \text{cost}, T^0 = \text{cost}, s^0 = \text{cost}.$$

Scrivendo come:  $\rho^1, v^1, p^1, T^1, s^1$  le variazioni del primo ordine indotte nello stato di equilibrio, scelto come riferimento, dalle perturbazioni, si ottiene che le grandezze considerate possono essere riscritte come:

$$\rho = \rho^0 + \rho^1; \quad v = v^0 + v^1; \quad p = p^0 + p^1; \quad T = T^0 + T^1;$$

In cui i termini di ordine superiore vengono omissi. Sviluppando le equazioni riportate sopra e troncandole al primo ordine si ottengono le equazioni dell'acustica linearizzate al primo ordine:

$$\frac{\partial \rho^1}{\partial t} + \rho^0 \nabla v^1 = 0 \quad [4.9 \text{ a}]$$

$$\rho^0 \frac{\partial v^1}{\partial t} + \nabla p^1 = 0 \quad [4.9 \text{ b}]$$

$$T^0 \rho^0 \frac{\partial s^1}{\partial t} = 0 \quad [4.9 \text{ c}]$$

La terza equazione proposta presenta la proprietà fondamentale di isoentropia della perturbazione acustica in un fluido semplice e non dissipativo che significa:

$$s^1 = \text{cost.} \quad \forall t$$

Basandosi sulle equazioni dello stato termodinamico del sistema si può assumere che le variazioni di densità e di temperatura siano linearmente proporzionali alla variazione di pressione che rappresenta il campo acustico. Per questo motivo, sommando alla derivata nel tempo dell'equazione di conservazione della massa il gradiente dell'equazione di conservazione del momento lineare, si ottiene l'equazione d'onda per l'acustica di pressione:

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla^2 p = 0 \quad \text{in } \Omega \quad [4.10]$$

In cui il coefficiente “c” corrisponde alla velocità del suono:

$$c = \sqrt{\frac{k_s^0}{\rho_0}} \quad [4.11]$$

L'equazione d'onda espressa in termini di pressione può anche essere manipolata matematicamente per ottenere, sempre su tutto il volume  $\Omega$ , la stessa equazione ma in funzione di: velocità, densità e temperatura:

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \nabla^2 v = 0 \quad [4.12 \text{ a}]$$

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \nabla^2 \rho = 0 \quad [4.12 \text{ b}]$$

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \nabla^2 T = 0 \quad [4.12 \text{ c}]$$

### 4.2.2 Acustica termoviscosa

L'acustica termoviscosa viene applicata nei domini che occupano e circoscrivono le fenditure del dispositivo. In queste zone l'aria, quando il dispositivo vibra, si comporta come un solido dalle basse proprietà meccaniche e si muove solidalmente ai lembi del diaframma determinando un comportamento del dispositivo simile a quello di una membrana chiusa. Serve a misurare la variazione acustica di temperatura, velocità e di pressione.

La scala di dimensioni su cui ha senso utilizzare una descrizione di acustica termoviscosa è data dallo spessore dello strato limite viscoso (la profondità di penetrazione viscosa) dato dalla formula:

$$\delta_v = \sqrt{\frac{\mu}{\pi f \rho_0}} \quad [4.13]$$

E dallo spessore dello strato limite termico (profondità di penetrazione termica):

$$\delta_t = \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho_0 C_p}} \quad [4.14]$$

In cui:

- f: frequenza [Hz]
- k: conducibilità termica [W/(m·K)]

- $\mu$ : viscosità dinamica [Pa·s]
- $\rho_0$ : densità di equilibrio [kg/m<sup>3</sup>]
- $C_p$ : capacità termica a pressione costante [J/(m<sup>3</sup>·K)]

Lo spessore di tutti e due gli strati limite dipende dalla frequenza e, in particolare, decresce aumentando la frequenza. Il rapporto tra queste due grandezze è relazionabile al numero adimensionale di Prandtl “Pr” che definisce l’importanza relativa dei contributi termico e viscoso per un dato materiale:

$$\frac{\delta_v}{\delta_t} = \sqrt{\frac{\mu C_p}{k}} = \sqrt{Pr} \quad [4.15]$$

Una volta definito dove ha senso applicare l’acustica termoviscosa, si illustrano brevemente le equazioni che la governano (facendo riferimento all’elaborato [25]) partendo dalle equazioni di conservazione precedentemente mostrate per l’acustica di pressione ma riscritte in forma locale e introducendo il coefficiente di espansività termica a pressione costante “ $\alpha_p$ ” che permette di esplicitare il termine entropico dell’equazione di conservazione dell’energia come funzione delle funzioni di stato temperatura e pressione. Nelle seguenti equazioni i termini riportati in grassetto sono le grandezze tensoriali.

$$\alpha_p = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad [4.16]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\rho} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \rho \dot{\vec{u}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \vec{F} \\ \rho C_p \dot{T} - \alpha_p T \dot{p} = \boldsymbol{\tau} : \mathbf{D} - \nabla \cdot \vec{q} + r \end{array} \right. \quad [4.17 \text{ a-c}]$$

In cui:

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau} = -p\mathbf{I} + \mu(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T) + \left(\mu_B - \frac{2}{3}\mu\right)\nabla \cdot \vec{u}\mathbf{I} \quad [4.18 \text{ a}]$$

$$\vec{q} = -k\nabla T = -k\nabla T \quad [4.18 \text{ b}]$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T) \quad [4.18 \text{ c}]$$

Si effettua quindi la linearizzazione nell'intorno dello stato omogeneo di riferimento in cui si ha:

$$\rho^0 = \text{cost}, \vec{u}^0 = \vec{0}, p^0 = \text{cost}, T^0 = \text{cost}, r^0 = 0, \vec{F}^0 = \vec{0}$$

Siano  $\rho^1, u^1, p^1, T^1$ , le espressioni differenziali del primo ordine dello stato di equilibrio scelto indotte dalle perturbazioni  $\vec{F}^1, r^1$ . Assumendo perturbazioni armoniche complesse del tipo (da ora in avanti si riportano in grassetto le entità complesse)

$$\vec{F}^1 = \vec{\mathfrak{F}}^1 e^{j\omega t}; \quad r^1 = R^1 e^{j\omega t}$$

Si ottiene il sistema linearizzato:

$$j\omega\rho^1 + \rho^0\nabla \cdot \vec{U}^1 = 0 \quad [4.19 \text{ a}]$$

$$j\omega\rho^0\vec{U}^1 = \nabla \cdot \left(-\mathbf{P}^1\mathbb{I} + \mu(\nabla\vec{U}^1 + \nabla\vec{U}^{1T}) + \left(\mu_B - \frac{2}{3}\mu\right)\nabla \cdot \vec{U}^1\mathbb{I}\right) + \vec{\mathfrak{F}}^1 \quad [4.19 \text{ b}]$$

$$j\omega\rho^0 C_p^0 T^1 - j\omega\alpha_p^0 T_0 P^1 = -\nabla \cdot (-k\nabla T^1) + R^1 \quad [4.19 \text{ c}]$$

Che viene accoppiato all'equazione di stato in termini di ampiezze complesse delle variazioni di temperatura e pressione dello stato di riferimento:

$$\rho^1 = \rho^0(P^1\chi_T^0 - T^1\alpha_p^0)$$

[4.20]

Dove il termine " $\chi_T = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$ " rappresenta la compressibilità isoterma. Questo è il set di equazioni che descrive il comportamento generale di un fluido compressibile soggetto a piccole perturbazioni armoniche a partire dallo stato di riferimento [25].

### 4.3 Accoppiamenti multi-fisici

Una volta definite le leggi della fisica governanti le diverse porzioni del modello, si imposta il modo in cui le fisiche implementate interagiscono tra di loro e di conseguenza si ha la formulazione definitiva del problema.

#### 4.3.1 Interazione acustico-strutturale

In primo luogo, si fa riferimento all'accoppiamento Acustico-Strutturale. Esso è un accoppiamento di contorno nel senso che non interessa l'intero volume dei domini a cui sono applicate le fisiche in questione, ma avviene solamente all'interfaccia tra i domini confinanti che le presentano. L'accoppiamento include sia il carico generato dal fluido sulla struttura che l'accelerazione della struttura a cui è sottoposto il fluido. Matematicamente la condizione sui contorni esterni risulta essere:

$$F_A = p_t n \quad [4.21]$$

$$-n \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) = -n u_{tt} \quad [4.22]$$

In cui “ $u_{tt}$ ” è l'accelerazione strutturale, “ $n$ ” è il versore normale alla superficie considerata, “ $p_t$ ” è la pressione acustica totale e “ $F_A$ ” è il carico per unità di area a cui è sottoposta la struttura da parte del fluido [10].

#### 4.3.2 Interazione termoacustico-strutturale

Un ulteriore tipo di accoppiamento è quello termo-visco-acustico-strutturale che impone la continuità del campo di spostamenti.

$$u_{t,fluid} = i\omega u_{solid} \quad [4.23]$$
$$u_{t,fluid} = \frac{\partial u_{solid}}{\partial t}$$

In cui “ $u_{t,fluid}$ ” è la velocità totale del fluido e “ $u_{solid}$ ” è lo spostamento del solido. Questo accoppiamento risulta anche in una continuità dello sforzo a cavallo del confine. La condizione per la temperatura totale può essere impostata sia come isoterma che come adiabatica.

### 4.3.3 Interazione termoacustica-acustica

Da ultimo si ha l'accoppiamento Acustico-Termo-visco-acustico che prescrive la continuità per lo sforzo totale normale (condizione dinamica) e l'accelerazione totale normale per la parte meccanica (condizione cinematica). Viene anche imposta una condizione di adiabaticità per la temperatura totale, per cui il flusso di calore non può attraversare la frontiera di versore normale “ $n$ ” [10].

$$\left[ P_{II} + \mu(\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) + \left( \mu_B - \frac{2}{3}\mu \right) \nabla \cdot \vec{U}_{II} \right] \hat{n} = -P_{ac} \hat{n} \quad [4.24 \text{ a}]$$

$$j\omega \vec{U} \cdot \hat{n} = \left( \frac{1}{\rho^0} (\nabla P_{ac}) \right) \cdot \hat{n} \quad [4.24 \text{ b}]$$

$$(-k\nabla T) \cdot \hat{n} = 0 \quad [4.24 \text{ c}]$$

In cui “ $P_{ac}$ ” è l'ampiezza del campo di pressione nel dominio acustico.



# 5

## MODELLI AD ELEMENTI FINITI

### 5.1 Introduzione

In questo capitolo si introduce il software utilizzato per la modellazione dei microspeakers. Il programma utilizzato è COMSOL Multiphysics ver. 5.5. Nella prima parte del capitolo si riportano le riproduzioni di alcuni dei dispositivi presentati nello stato dell'arte. La modellazione di tali dispositivi ha permesso di capire come impostare correttamente il problema relativo ai microspeakers in modo tale da avere una procedura affidabile adatta allo studio di nuove configurazioni. Con queste ultime, presentate nell'ultima sezione del capitolo, si è cercato di migliorare le prestazioni dei dispositivi attualmente disponibili.

La modellazione multifisica di un dispositivo inizia dalla creazione di una geometria che presenti in modo dettagliato le specifiche dell'oggetto che si vuole riprodurre. Tale geometria viene solitamente creata in modo parametrico, cioè riferendosi a determinate dimensioni fondamentali dell'oggetto in modo tale che sia più immediata la modifica di certi parametri, come ad esempio la dimensione del diaframma o gli spessori degli strati che costituiscono la struttura, qualora fosse necessario lo studio delle prestazioni al variare di essi.

La geometria comprende tutti i domini di spazio utili all'analisi del dispositivo, per cui nel caso dei microspeakers vengono modellate anche regioni di spazio in cui il dispositivo non è presente, ma su cui l'azione di esso comporta un cambiamento, ad esempio i domini d'aria intorno al dispositivo.

Una volta completata la modellazione della geometria si assegnano i materiali ai vari domini creati. Nell'assegnazione dei materiali si introducono tutte le grandezze fondamentali per la loro descrizione, ad esempio, per quanto riguarda i domini solidi,

dei parametri imprescindibili per l'analisi sono il modulo di Young e il coefficiente di Poisson. Ogni materiale dopodiché avrà le proprie caratteristiche specifiche per cui, sempre a titolo d'esempio, per il materiale piezoelettrico vengono specificate la matrice di elasticità e la matrice di accoppiamento in notazione di Voigt.

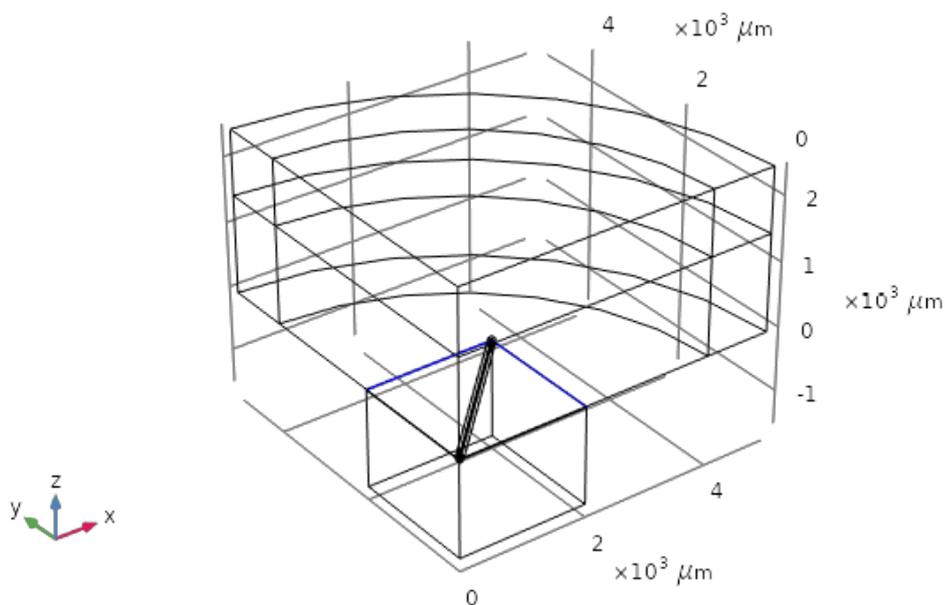
Per ogni dominio costruito si procede poi all'assegnazione delle leggi fisiche che lo governano e, in seguito a questo passaggio, si determinano gli accoppiamenti multifisici da implementare nel modello.

Infine, si suddivide opportunamente la geometria in elementi finiti e si impostano gli studi che si vogliono eseguire per arrivare a determinati risultati.

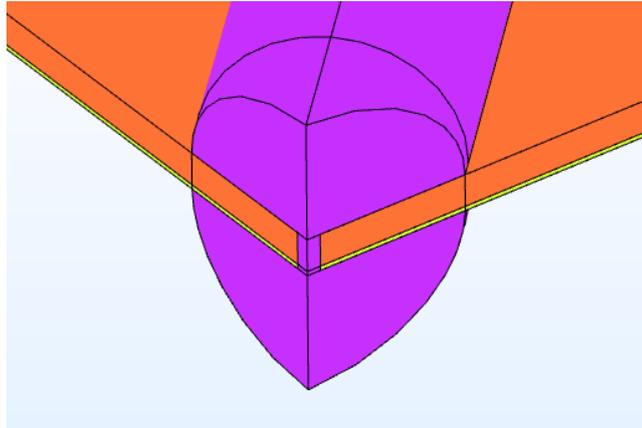
## 5.2 Tweeter proposto dall'Istituto Fraunhofer ISIT

Questo modello riprende il lavoro illustrato nel capitolo 3.2.3.2. Di seguito vengono presentati i passaggi fondamentali della modellazione e i risultati interessanti per un confronto con strutture successive. Il processo di modellazione, l'assegnazione degli accoppiamenti multifisici e la discretizzazione in elementi finiti saranno replicati nei seguenti modelli allo stesso modo, per non appesantire la descrizione si entra nel dettaglio solo di questo modello che verrà ripreso nella descrizione dei successivi.

La geometria studiata presenta quattro diaframmi triangolari stratificati in due strati di materiale: uno strato di Silicio spesso 15 [ $\mu\text{m}$ ] e uno strato di PZT spesso 2 [ $\mu\text{m}$ ]. Questi due strati costituiscono gli unici domini solidi della struttura, a cui vengono applicate le leggi della meccanica dei solidi e la relazione costitutiva dei materiali lineari elastici. Nel modello viene costruita solamente una porzione (un quarto) del dispositivo vista la sua configurazione simmetrica, per questo motivo anche le rappresentazioni seguenti mostrano solamente la parte studiata. Sui bordi della geometria disegnata verrà poi imposta una condizione di simmetria in modo tale che i risultati simulino il comportamento del dispositivo completo. La membrana costituita dai quattro diaframmi separati tra di loro da fenditure larghe 5 [ $\mu\text{m}$ ], è vincolata, nel modello, sui propri bordi esterni (evidenziati in figura 5.1 in blu) tramite un vincolo fisso ovvero che impone spostamenti nulli:

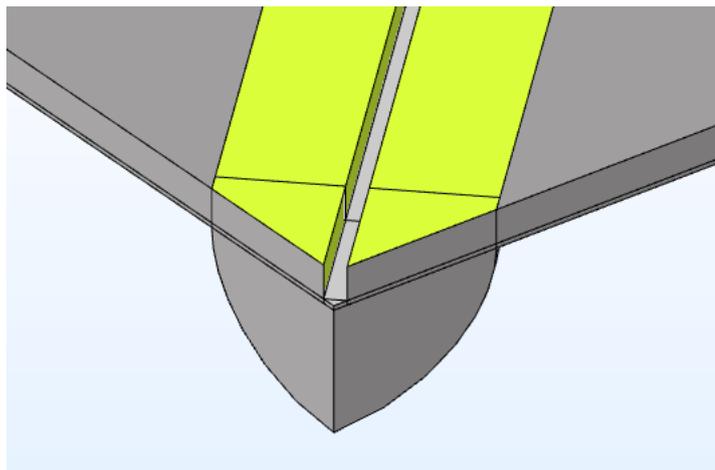


**Figura 5.1:** Contorni a cui è assegnato il vincolo fisso.



**Figura 5.2:** Dettaglio della struttura: in viola i domini termo-acustici, in arancione lo strato di silicio, in giallo lo strato di PZT.

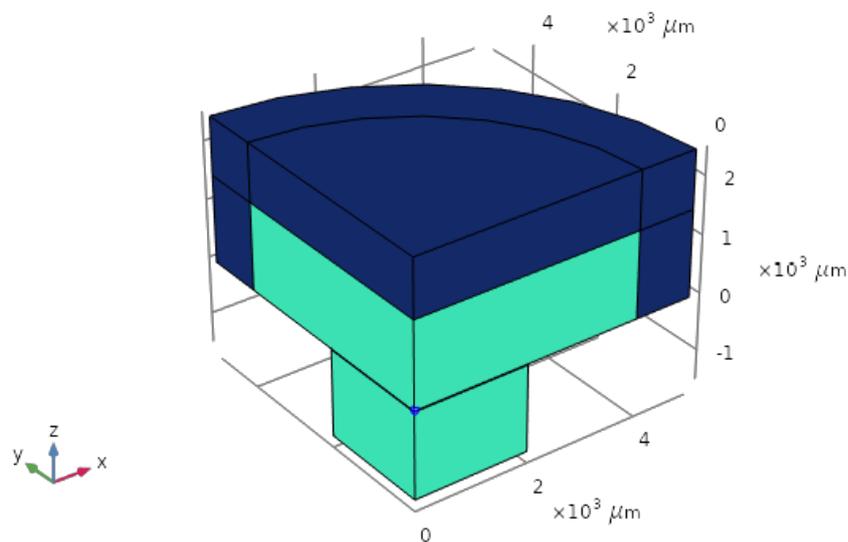
Facendo riferimento alla figura 5.2, in cui si osservano gli strati di materiale che costituiscono il dispositivo, può essere specificato come venga imposta l'attuazione al dispositivo. Sulla faccia inferiore dello strato di PZT viene imposta una condizione al contorno di messa a terra, per cui si assegna un valore di potenziale pari a 0 [V]; per la faccia superiore dello strato di materiale piezoelettrico, invece, viene assegnata una condizione di terminale imponendo un potenziale costituito da 1 [V] DC + 0.2 [V] AC. Su queste facce non vengono modellati gli strati che costituiscono gli elettrodi, ma viene semplicemente aggiunta, sulle rispettive facce di messa a terra e di terminale, la condizione al contorno di massa aggiunta, data, in teoria, dalla presenza degli elettrodi. Per la faccia inferiore si usa la densità superficiale dell'Oro (data dal prodotto tra la sua densità volumica e lo spessore teorico dello strato), per la faccia superiore invece vengono considerati la densità e lo spessore di un elettrodo in Platino.



**Figura 5.3:** Contorni di accoppiamento termoacustico-strutturale

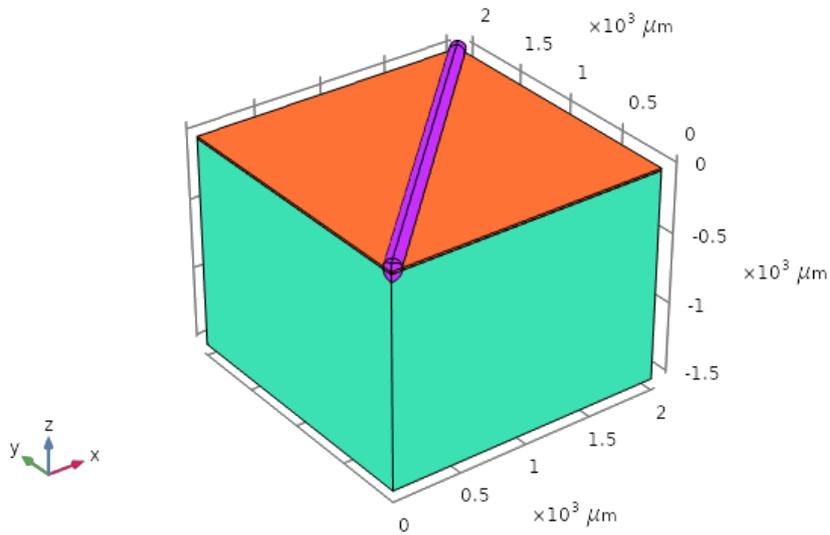
In figura 5.3 vengono evidenziati in giallo i contorni su cui viene imposto l'accoppiamento termoacustico-strutturale. In queste regioni viene rispettata la condizione vista nel capitolo precedente [4.23].

La struttura solida è immersa in domini fluidi che vengono esternamente troncati, nella parte soprastante al dispositivo, da alcuni strati in cui è imposto assorbimento completo che si chiamano PML (Perfectly Matched Layer) utilizzati per simulare il problema in confine aperto. A tutti questi domini verrà assegnato il materiale "aria" e in essi verranno risolte le equazioni dell'acustica classica [4.9 a-c]. Nei PML, evidenziati in blu scuro in figura, queste ultime sono risolte tramite la tecnica di integrale di Helmholtz-Kirchhoff [10].



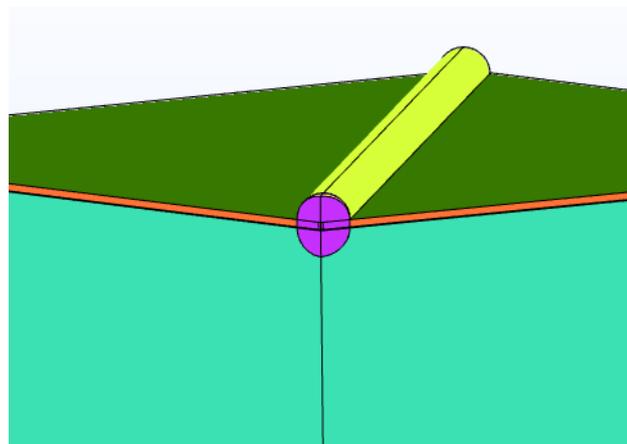
**Figura 5.4:** Domini d'aria circostanti la struttura del microspeaker.

Attorno alle fenditure, invece, è stato modellato un dominio cilindrico con raggio pari a sei volte lo spessore della fenditura in cui si verranno imposte le leggi dell'acustica termoviscosa [4.19 a-c] (in viola nella figura 5.5 a pagina seguente). Viene modellato il dominio di acustica termo-viscosa di questa dimensione in quanto in questa distanza il fenomeno acustico tende a diventare non dissipativo e isoentropico (come già visto nelle analisi fatte dai ricercatori dell'Istituto Fraunhofer ISIT [8]) per cui descrivibile tramite le leggi dell'acustica classica.



**Figura 5.5:** Dominio termo-viscoso che circoscrive la fenditura, evidenziato in viola.

Infine, vengono evidenziati in figura 5.6 i contorni in cui vengono applicati gli altri accoppiamenti multifisici. In giallo viene evidenziato il contorno su cui sono imposte le leggi [4.24 a-c], ovvero l'accoppiamento tra le leggi dell'acustica classica e quelle dell'acustica termoviscosa. In verde, invece, le regioni in cui si ha accoppiamento acustico-strutturale, in cui vengono imposte quindi le leggi [4.21] e [4.22]. Per ragioni pratiche non vengono evidenziate anche le corrispettive facce inferiori, ma anche su quelle vengono imposti gli stessi accoppiamenti.



**Figura 5.6:** Contorno verde, accoppiamento acustico-strutturale.

Contorno giallo, accoppiamento termoacustico-acustico.

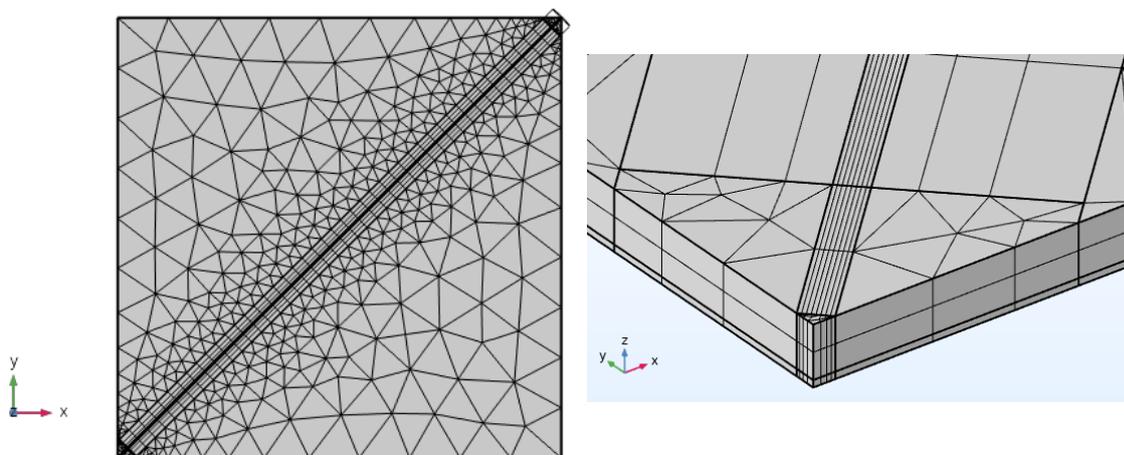
## 5.2.1 Mesh

A seguire, la descrizione della mesh nei diversi domini del problema multifisico oggetto di studio.

### 5.2.1.1 Dominio solido

I domini solidi del sistema, ovvero i due strati di materiale costituiti da piezoelettrico e Silicio, sono discretizzati creando una mesh costituita da elementi appartenenti alla famiglia “Serendipity quadratici”. Inizialmente avviene la costruzione di una discretizzazione triangolare non strutturata sulla superficie superiore dei domini ed estrudendo gli elementi per tutto lo spessore del diaframma. Dopodiché viene specificata la distribuzione degli elementi nei materiali, in particolare viene mantenuto un solo elemento per lo strato di PZT e vengono imposti due elementi per lo strato di Silicio. Nei domini solidi che risultano essere confinanti con i domini termoacustici, e nel dominio che costituisce l’intaglio, viene mappata superficialmente una mesh di tipo quadrilatero con diverse distribuzioni di elementi; in particolare, nei domini che costituiscono la fenditura vengono imposti otto elementi nello spessore di quest’ultima, in modo tale da avere una maggior precisione nello studio dei fenomeni che avvengono all’interno dell’intercapedine. Nei domini appartenenti al diaframma vengono imposti tre elementi sullo spessore sia a destra che a sinistra dell’intaglio. Questa mesh verrà estrusa insieme a quella della restante parte del diaframma per tutto lo spessore del dispositivo e seguendo le distribuzioni illustrate prima.

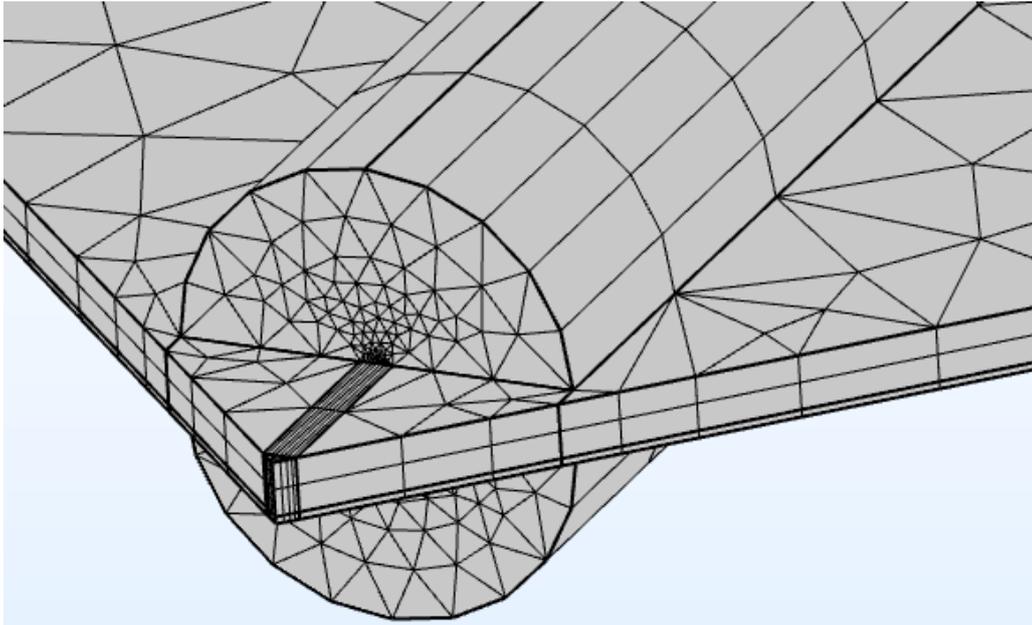
La dimensione massima degli elementi viene definita utilizzando come parametro lo spessore dello strato limite viscoso ( $\delta_v$ ), In particolare sui domini mappati la dimensione massima risulta essere di quattro volte  $\delta_v$ , mentre per quanto riguarda i domini rimanenti la dimensione massima viene impostata come quindici volte lo spessore dello strato limite viscoso.



**Figura 5.7:** Mesh superficiale dei domini solidi, la porzione che circonda la fenditura è discretizzata con elementi quadrilateri, la restante parte del dominio solido presenta elementi triangolari.

### 5.2.1.2 Dominio termo-viscoso

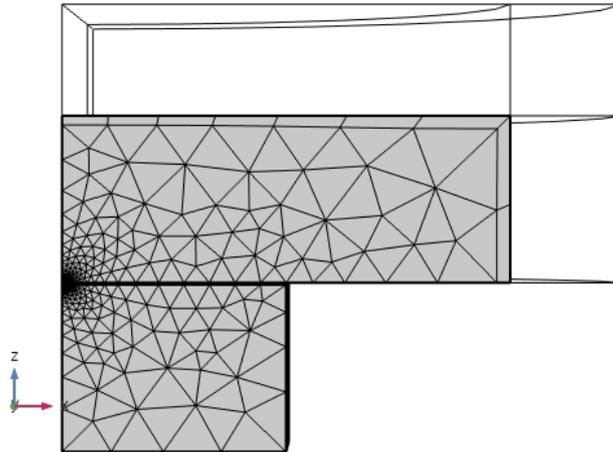
Nel dominio termo-viscoso la mesh creata è di tipo ibrido, costituita da elementi esaedrici e cuneiformi. In particolare, nel cilindro che circonda la fenditura, viene costruita una mesh estrusa a partire da una delle due facce del cilindro che viene discretizzata con dei triangoli non strutturati. La discretizzazione dell'intercapedine, invece, è stata già discussa nel paragrafo precedente.



**Figura 5.8:** Dettaglio della mesh costruita sul cilindro che circonda la fenditura e in cui sono risolte le leggi dell'acustica termo-viscosa.

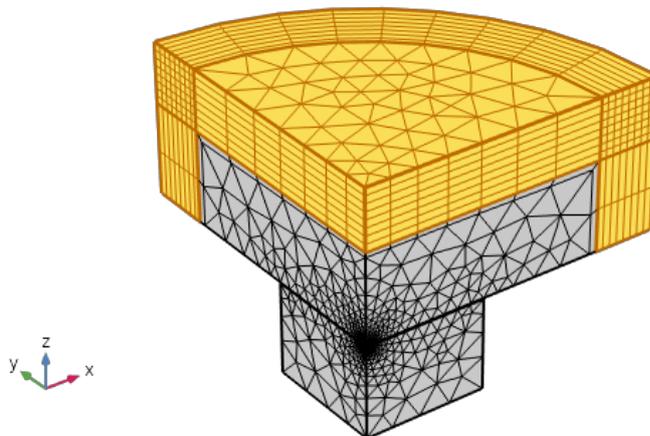
### 5.2.1.3 Dominio fluido

La mesh del dominio fluido è anch'essa una mesh di tipo ibrido. Presenta elementi di tipo piramidale in prossimità dell'interfaccia tra dominio acustico e dominio termo-acustico, è invece costituita da elementi tetraedrici non strutturati nella restante parte dei domini. Le dimensioni di tale mesh sono impostate a partire dall'interfaccia solido-fluido, cioè dagli elementi già definiti per il dominio solido, in modo che ci sia continuità negli elementi che costituiscono la discretizzazione. In prossimità dei domini in cui è imposta la condizione di PML, si definisce uno strato limite costituito da un solo layer come si vede in figura 5.9:



**Figura 5.9:** Mesh del dominio fluido con strato limite in prossimità dei PML.

Per quanto riguarda le regioni in cui è imposta la condizione di strato perfettamente assorbente (PML, in giallo in figura 5.10) la mesh viene estrusa a partire dai contorni dei domini fluidi appena descritti. In questo caso vengono inseriti otto elementi nello spessore.



**Figura 5.10:** Dettaglio della mesh costruita nei domini fluidi più esterni.

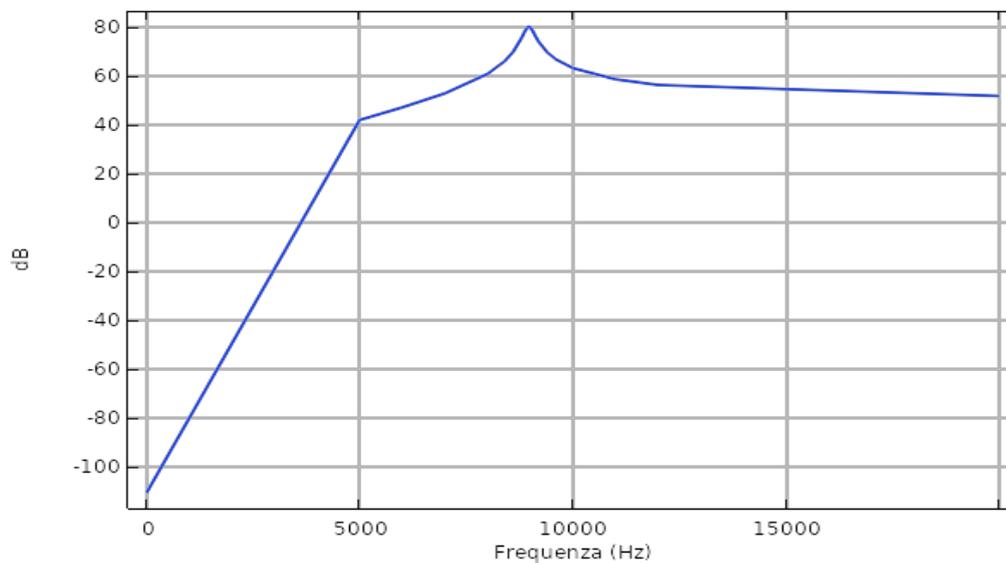
Il processo di creazione della mesh e della geometria è simile in tutte le configurazioni di microspeakers che verranno trattate in seguito. Di conseguenza per ogni configurazione la descrizione sarà molto meno prolissa e si limiterà semplicemente alla descrizione degli elementi che vengono modificati rispetto a questa configurazione presa di riferimento.

## 5.2.2 Risultati delle simulazioni

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati ottenuti dalle simulazioni. Lo studio che è stato fatto è un'analisi di perturbazione in dominio delle frequenze. Viene ottenuta così la risposta in frequenza del dispositivo per valutare la sua emissione acustica. Non viene presentata una configurazione di riferimento diversa da quella ideale poiché non vengono forniti dati sugli sforzi residui presenti nei materiali.

### 5.2.2.1 Risposta in frequenza dell'intensità acustica:

In questa sezione viene presentata la curva di risposta in frequenza del livello di pressione sonora generata dal dispositivo (SPL). Il calcolo viene effettuato globalmente, ad una distanza di 100 [mm] lungo l'asse verticale, ortogonale al piano su cui giace il dispositivo e passante per il suo centro. Questo calcolo può essere fatto anche se la distanza a cui si verifica il livello di pressione risulta essere superiore alla dimensione dei domini modellati grazie alla definizione degli strati PML. Come si può notare dalla curva presentata in figura 5.11, il livello di SPL raggiunge il suo massimo alla frequenza di risonanza fondamentale del sistema, arrivando ad un valore di 80 [dB]. L'emissione, invece, inizia dopo i 3 [kHz], per questo motivo il dispositivo, che raggiunge livelli di emissione accettabili solo alle alte frequenze, viene catalogato come tweeter.



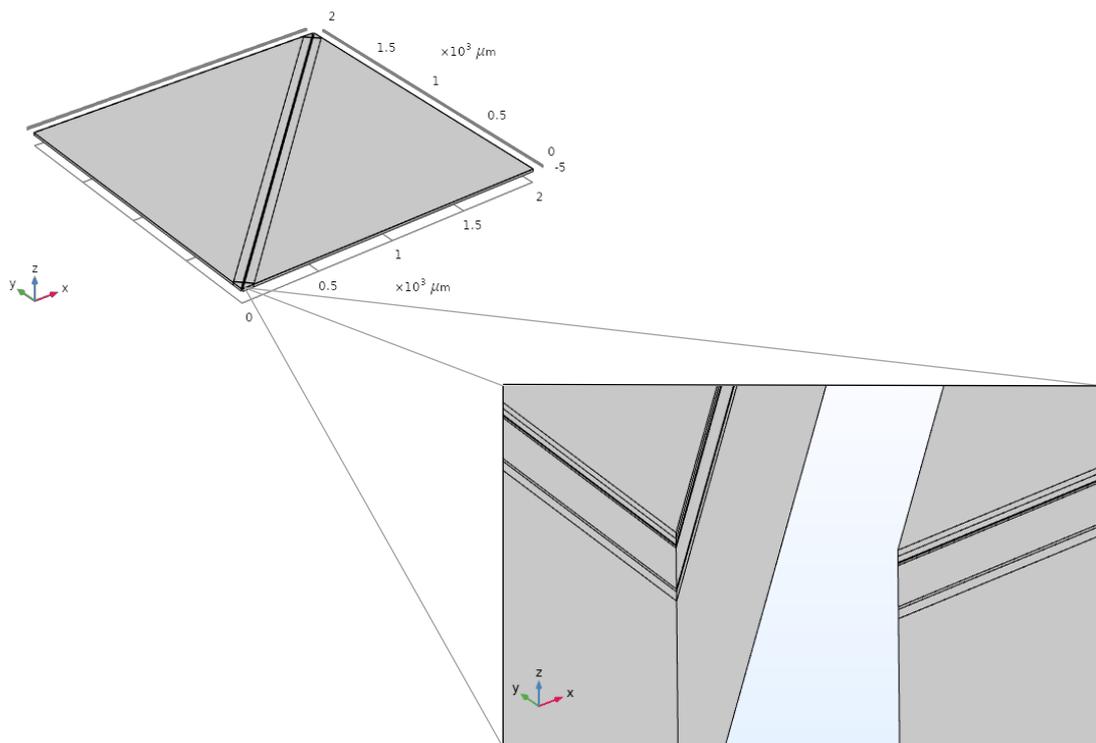
**Figura 5.11:** Grafico di risposta in frequenza del livello di pressione sonora generato dal dispositivo tweeter presentato in [15].

### 5.3 Tweeter Fraunhofer con stratigrafia modificata

Dopo aver analizzato il modello con i parametri proposti dai ricercatori dell'Istituto Fraunhofer con l'intento di capire come sviluppare i modelli relativi a questi dispositivi, nell'ottica di effettuare degli studi con parametri realistici, sono stati implementati nel modello parametri geometrici e meccanici caratterizzanti il problema forniti gentilmente dall'azienda STMicroelectronics. A partire da questo modello, tutti i calcoli sono stati fatti a partire da questo set di valori forniti, anche per i successivi modelli analizzati. Si è deciso, a causa della confidenzialità delle informazioni, di non riportare i valori numerici che determinano il design dei sistemi.

Per un'analisi comparativa è stata dunque riprodotta la stessa configurazione riportata in precedenza modificando semplicemente la stratigrafia, ossia la disposizione dei layer che costituiscono il dispositivo e i materiali che la compongono. Chiaramente si può genericamente affermare che nella modellazione dello speaker piezoelettrico si sono mantenuti uno strato di Silicio, spesso 15 [ $\mu\text{m}$ ] ed uno strato di materiale piezoelettrico, spesso 2 [ $\mu\text{m}$ ], ad attuazione del dispositivo.

In figura 5.12 viene riportato un dettaglio della nuova stratificazione implementata nel modello.



**Figura 5.12:** Dettaglio della stratigrafia utilizzata nel dispositivo.

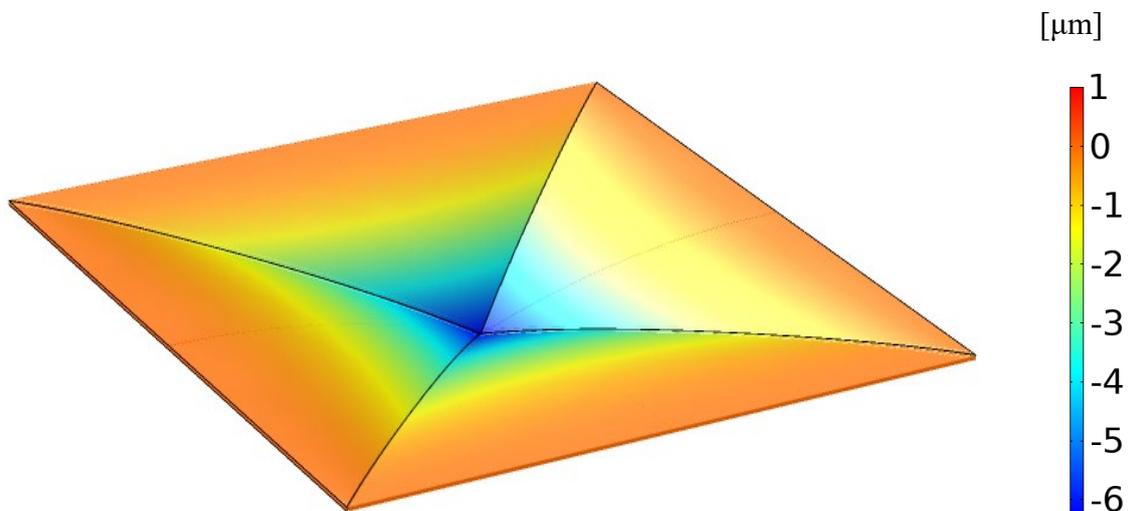
Per quanto riguarda la discretizzazione della geometria, sono stati utilizzati gli stessi metodi che sono stati presentati nel modello preso come riferimento al capitolo 5.2.

### 5.3.1 Risultati delle simulazioni

In questo modello sono state analizzate: la configurazione di riferimento del dispositivo data dagli sforzi residui, le autofrequenze del sistema e la risposta in frequenza del livello di pressione acustica generato dal dispositivo. Queste analisi però sono state svolte, a differenza del caso precedente, con un'attuazione di 1 [V] DC e 0.1 [V] AC.

#### 5.3.1.1 Configurazione di riferimento

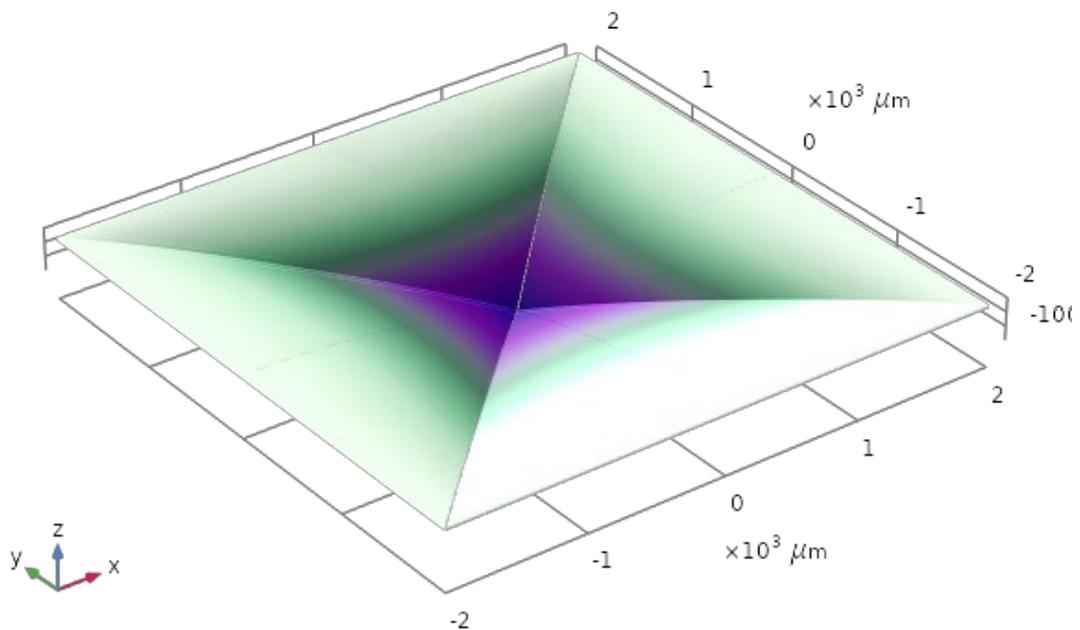
La struttura risulta imbarcarsi a causa degli stress residui fino ad un massimo scostamento, rispetto alla situazione ideale senza la presenza di questi sforzi, di 6,21 [ $\mu\text{m}$ ] come riportato nella seguente figura.



**Figura 5.13:** Configurazione di riferimento per la struttura Tweeter con stratigrafia modificata rispetto al modello presentato in [15].

### 5.3.1.2 Analisi dei modi di vibrazione

Tramite un'analisi alle autofrequenze vengono studiate le frequenze di risonanza del sistema. È stata trovata la risonanza del sistema a 10.2 [kHz]. Questo valore, maggiore rispetto a quello trovato nel modello precedente suggerisce un irrigidimento del sistema con conseguente slittamento della frequenza di risonanza verso valori più alti. In figura 5.14 il modo di vibrazione della membrana alla frequenza di risonanza:

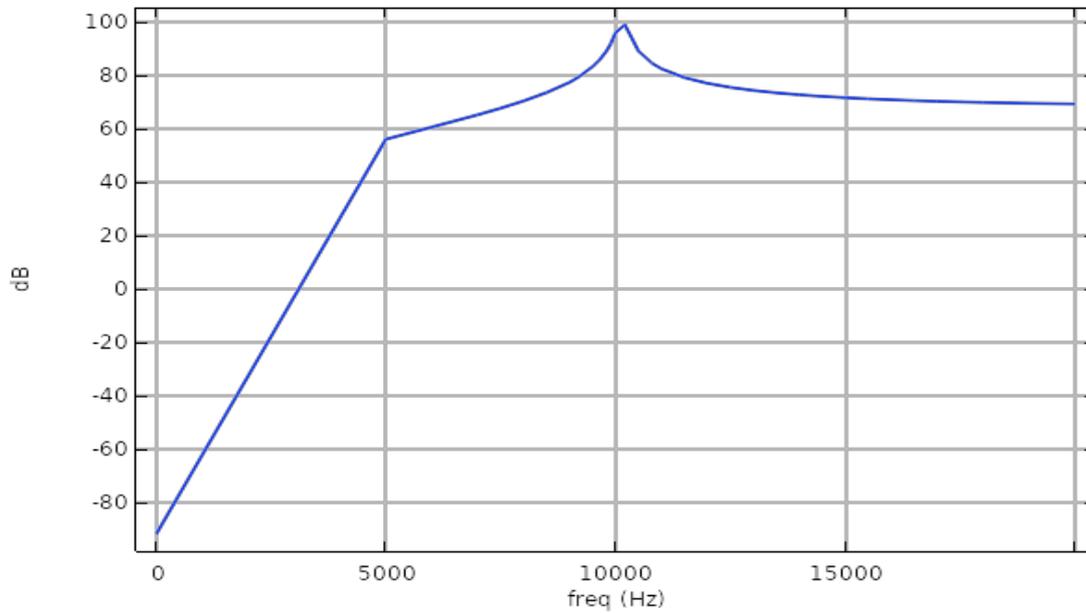


**Figura 5.14:** Deformazione relativa al modo di risonanza del dispositivo posto a 10.2 [kHz].

### 5.3.1.3 Risposta in frequenza dell'intensità acustica

Esattamente come nel modello precedente, la risposta in frequenza del dispositivo presenta un picco di emissione sonora in corrispondenza della frequenza di risonanza del sistema, a 10.2 [kHz]. L'emissione a questa frequenza raggiunge un valore di 99 [dB]; in questo caso, però, la distanza a cui viene misurata l'intensità sonora emessa è di 1 [cm].

In figura 5.15 viene riportato l'andamento della curva che si sta analizzando, l'andamento qualitativo risulta essere molto simile a quello presentato nel modello precedente.

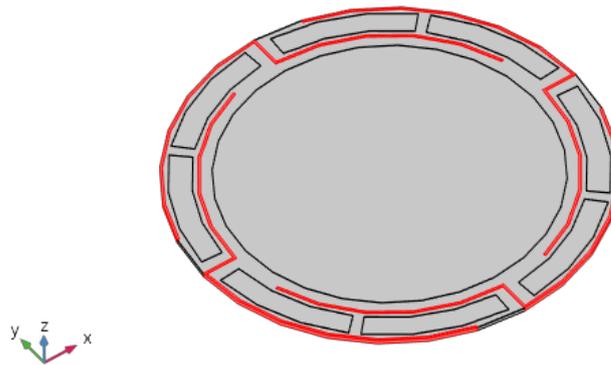


**Figura 5.15:** Grafico di risposta in frequenza del livello di pressione sonora generato dal dispositivo tweeter presentato in [15] con stratigrafia modificata in base ai valori gentilmente forniti da STMicroelectronics.

## 5.4 Modello proposto dalla National Tsing Hua University di Taiwan:

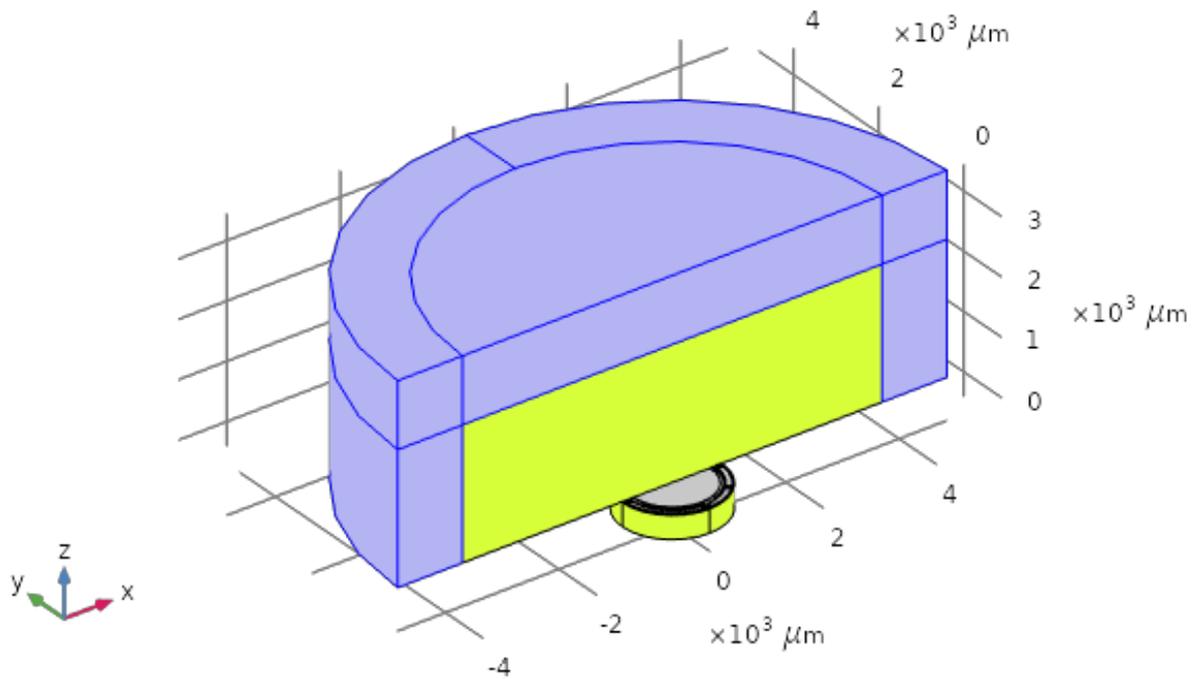
Questo modello fa riferimento al lavoro riportato nell'articolo presentato nello stato dell'arte al capitolo 3.2.4.3. La geometria studiata presenta quattro molle curve a sostegno di un diaframma centrale circolare. Gli elettrodi sono differenziati e disposti sia sulle molle che centralmente sul diaframma. La struttura sfrutta la stessa tecnica utilizzata dai ricercatori dell'Istituto Fraunhofer, ovvero l'utilizzo di fenditure sottili, in questo caso spesse  $9\text{ }\mu\text{m}$ , che garantiscano un comportamento del dispositivo simile a quello di una membrana chiusa. Il diaframma, come nell'articolo riportato, ha una superficie pari a  $1.67\text{ }\text{mm}^2$ .

In figura 5.16 la geometria modellata per quanto riguarda il diaframma, evidenziate in rosso le fenditure:



**Figura 5.16:** Diaframma del dispositivo presentato in [18] rimodellato in ambiente COMSOL Multiphysics.

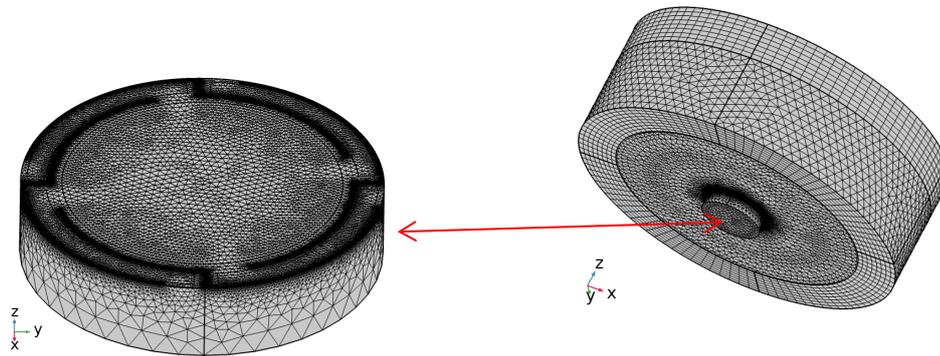
In un primo momento è stata riprodotta la stratificazione proposta dagli autori del dispositivo comprensiva di uno strato di silicio spesso  $2\text{ }\mu\text{m}$  e di uno strato di PZT spesso anch'esso  $2\text{ }\mu\text{m}$ . In secondo luogo, è stata riprodotta la struttura con la stratigrafia e i valori forniti gentilmente da STMicroelectronics. In tutti e due i casi vengono poi modellati i domini fluidi della struttura, come in precedenza, sia sopra che sotto alla struttura e con uno strato finale superiore di PML. In figura 5.17 la geometria completa del modello, valida per tutti e due i casi:



**Figura 5.17:** Modellazione completa del dispositivo con sezione dei domini d’aria superiori.  
 In giallo i domini d’aria generici, in azzurro i domini d’aria a cui viene assegnata la condizione di PML.

### 5.4.1 Mesh

Questo paragrafo è, come il precedente, comune a tutti e due i modelli proposti di questo dispositivo. La superficie del diaframma è discretizzata per mezzo di elementi triangolari non strutturati che vengono poi estrusi lungo tutto lo spessore del diaframma. Per quanto riguarda i domini d’aria, essi sono discretizzati tramite l’uso di una mesh ibrida costituita da tetraedri e piramidi e i PML per estrusione a partire dalle superfici già discretizzate del dominio fluido. La dimensione minima degli elementi nella mesh è pari ad un quarto della larghezza delle fenditure.



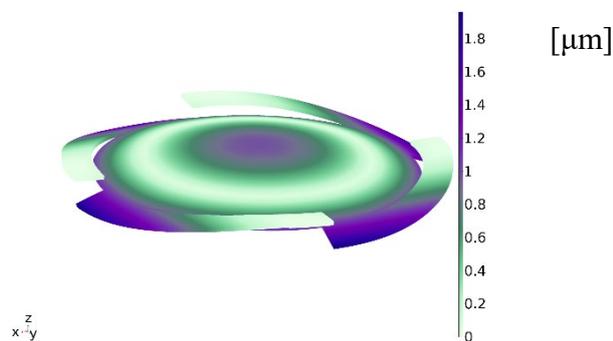
**Figura 5.18:** Discretizzazione dei domini del modello.

## 5.4.2 Risultati delle analisi

Le analisi svolte, per quanto riguarda questo dispositivo nelle due versioni, ancora una volta si focalizzano sulla configurazione di partenza, i modi di vibrazione della membrana e il livello di pressione sonora emesso dai dispositivi. Di seguito vengono presentati i risultati per tutte e due le configurazioni, specificando le condizioni di test delle diverse prove.

### 5.4.2.1 Configurazione di riferimento

La configurazione di riferimento viene calcolata solamente per il dispositivo in cui è presentata la stratigrafia proposta da STMicroelectronics, in quanto per la stratigrafia fornita negli articoli scientifici pubblicati dall'Università di Taiwan, non vengono forniti valori di stress residui nei materiali. La deformata iniziale del dispositivo presenta una flessione della struttura che non supera i 2 [ $\mu\text{m}$ ] di scostamento dalla configurazione di riferimento. La deformazione viene proposta in figura 5.19:



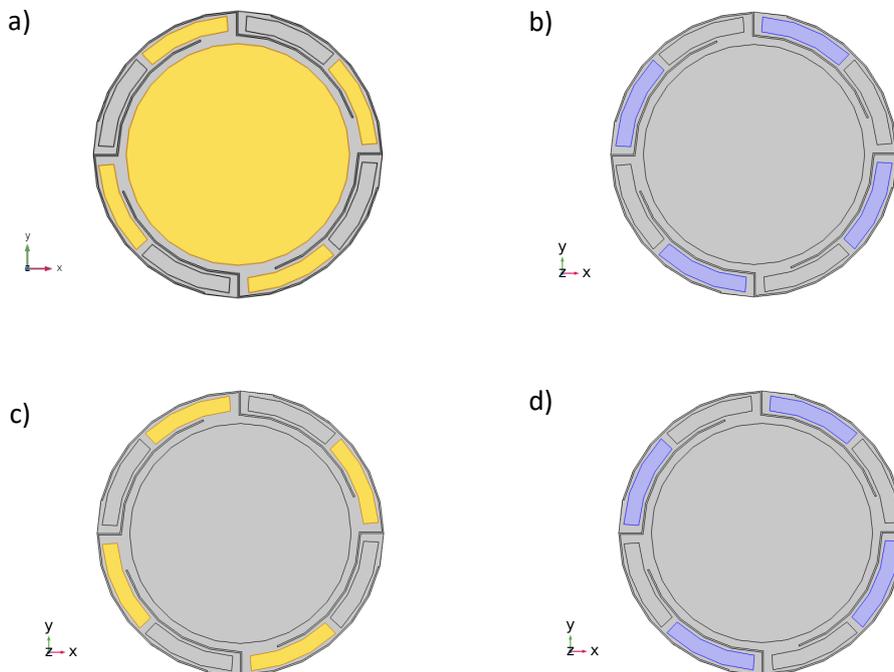
**Figura 5.19:** Pre-deflessione del dispositivo dovuta agli sforzi residui nei materiali

### 5.4.2.2 Modi di vibrazione e SPL

Per quanto riguarda l'analisi modale e la generazione di pressione acustica, esse vengono riportate in questo paragrafo insieme in quanto l'idea principale di questa tipologia di dispositivo è quella di avere più modi di risonanza nella banda dell'udibile in modo tale da mantenere la curva di emissione sonora a livelli più alti su tutta la banda che si estende dagli 0 [kHz] ai 20 [kHz]. Quindi, visto che le due misure sono strettamente collegate, si è deciso di presentarle insieme. Si differenziano, però, i due modelli in base alla stratigrafia utilizzata.

#### 5.4.2.2.1 Stratigrafia proposta dall'Università di Taiwan

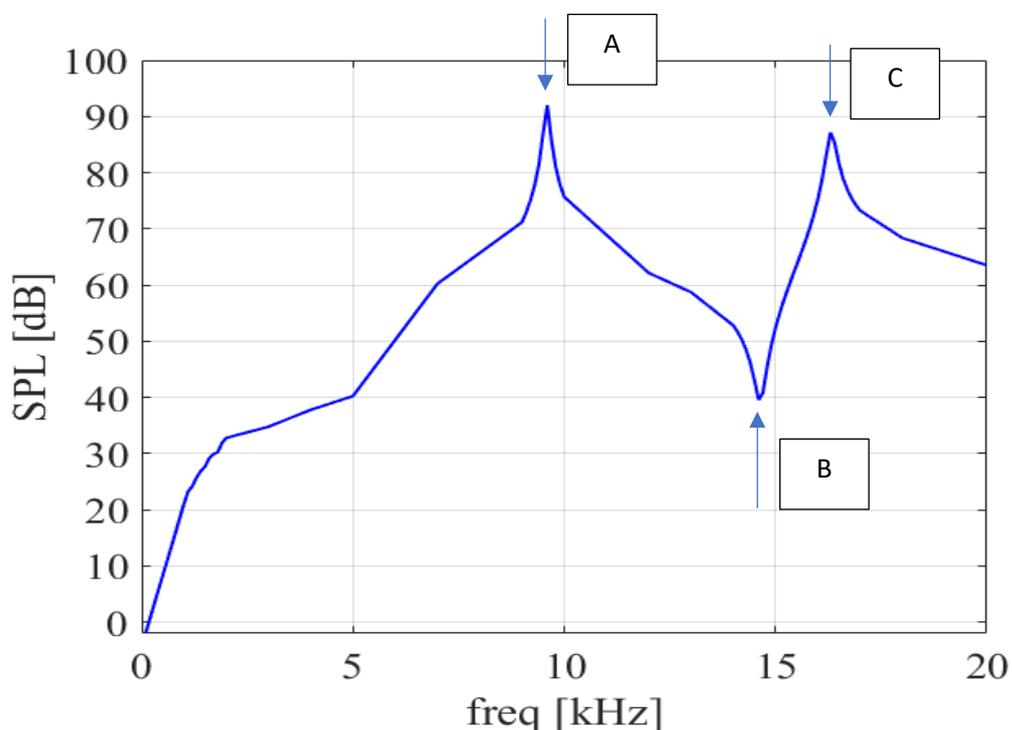
Per quanto riguarda questo dispositivo le analisi sono state svolte con due diversi tipi di attuazione. In tutti e due i casi è stato utilizzato 1 [V] DC e 1 [V] AC come tensione di attuazione. La differenza si trova negli elettrodi che vengono utilizzati per attuare il dispositivo. Come mostrato in figura 5.20 si hanno due condizioni di test: una prima modalità in cui viene attuato l'elettrodo centrale e in cui l'attuazione diretta e inversa sugli elettrodi delle molle avviene sullo stesso elettrodo; una seconda modalità di attuazione prevede la non attuazione dell'elettrodo centrale e la differenziazione degli elettrodi sulle molle per attuazione diretta ed inversa.



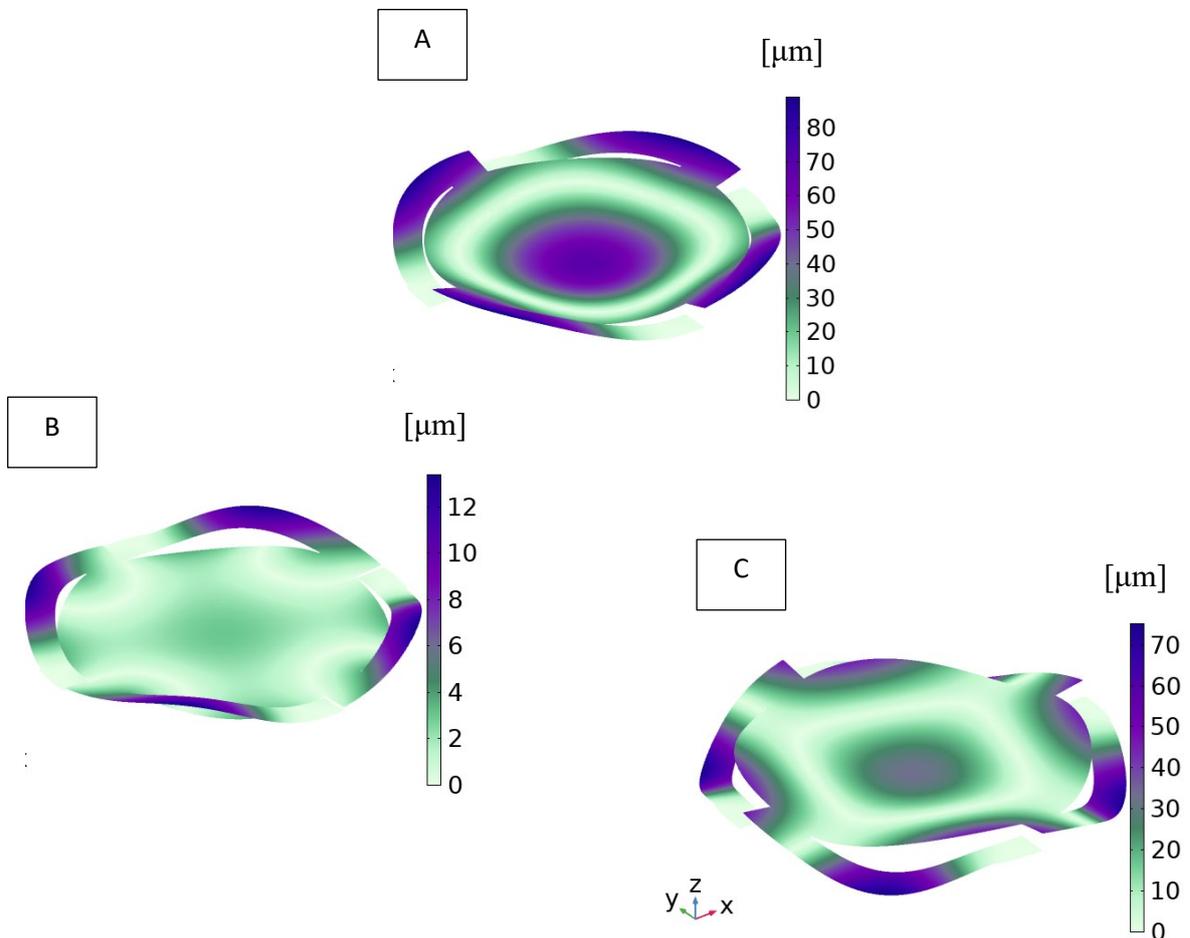
**Figura 5.20:** Attuazione diretta: (a), (c); attuazione inversa (b), (d). Prima modalità (a), (b); seconda modalità (c), (d).

Considerando il primo caso di attuazione, quindi quello che stimola l'elettrodo centrale, si osserva nei risultati che nella banda dell'udibile vengono stimolati tre modi di vibrazione. Due di questi modi sono utili alla diffusione sonora, un modo, invece, non risulta generare alcuna pressione sonora. La pressione sonora viene misurata alla distanza di 1 [cm] e raggiunge un picco di massimo, in corrispondenza del primo modo di vibrazione del diaframma, di 92 [dB] a circa 10 [kHz].

Nella figura 5.21 viene mostrata la curva di risposta in frequenza del dispositivo evidenziando i picchi relativi ai modi di risonanza. Vengono riportate anche le ampiezze di vibrazioni a tali frequenze (figura 5.22).



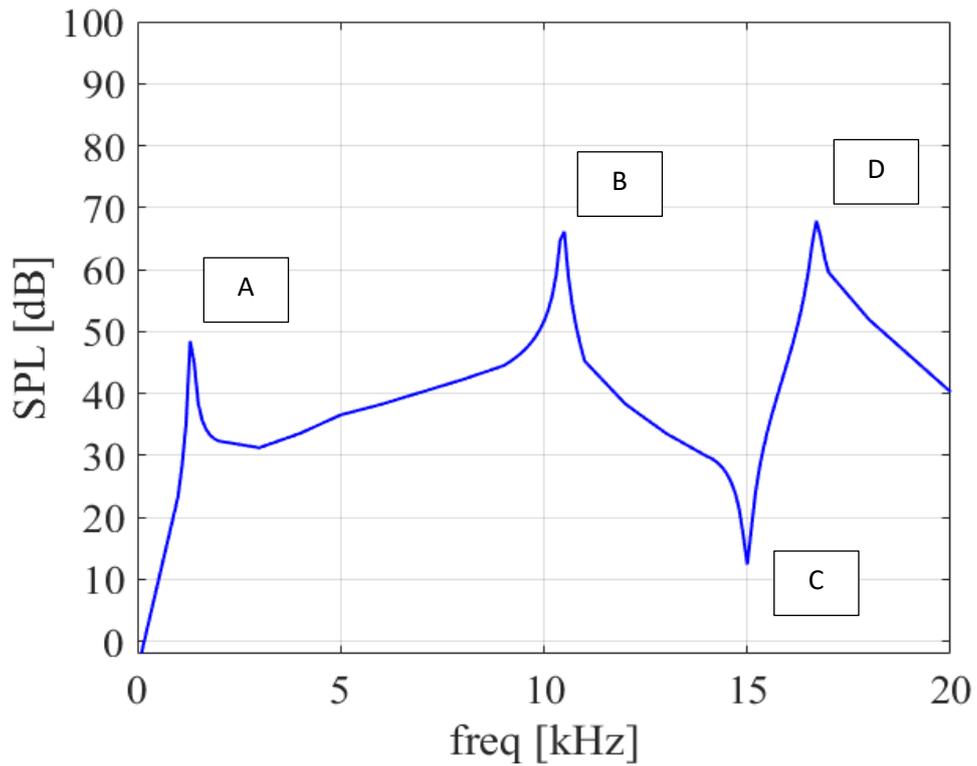
**Figura 5.21:** Risposta in frequenza del dispositivo. Evidenziati i picchi di risonanza, due modi contribuiscono all'emissione sonora (A) e (C), un modo, appena prima dei 15 [kHz] non contribuisce, anzi, diminuisce l'emissione del dispositivo.



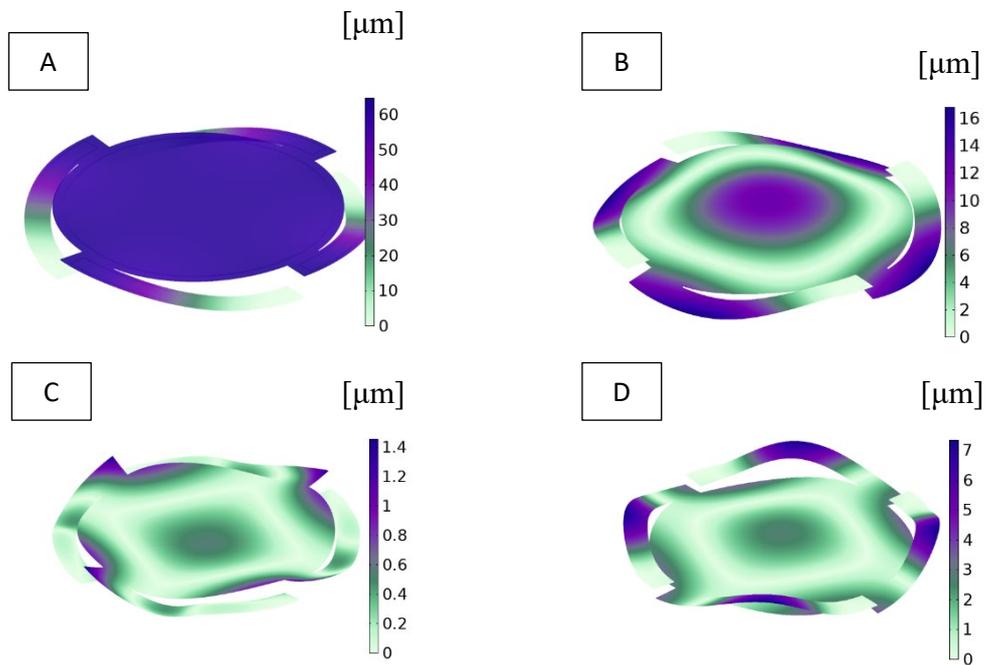
**Figura 5.22:** Ampiezze e configurazione di vibrazione del dispositivo  
rispettivamente a circa: A) 9,6 [kHz]; B) 14,8 [kHz]; C) 16,2 [kHz].

Considerando il secondo caso di attuazione, quindi quello che stimola esclusivamente gli elettrodi presenti sulle molle, si osserva che nella banda dell'udibile vengono stimolati quattro modi di vibrazione. Tre di questi modi sono utili alla diffusione sonora, un modo, invece, non risulta generare alcuna pressione sonora. La pressione sonora viene misurata anche in questo caso alla distanza di 1 [cm] e generalmente l'emissione acustica si abbassa a livello di intensità. Si raggiunge un picco di massimo della curva in corrispondenza del quarto modo di vibrazione del diaframma, di 68 [dB] a circa 16,8 [kHz].

Di seguito, in figura 5.23, viene mostrata la curva di risposta in frequenza del dispositivo evidenziando i picchi di emissione del sistema. Vengono riportate graficamente anche le ampiezze delle vibrazioni a tali frequenze in figura 5.24.

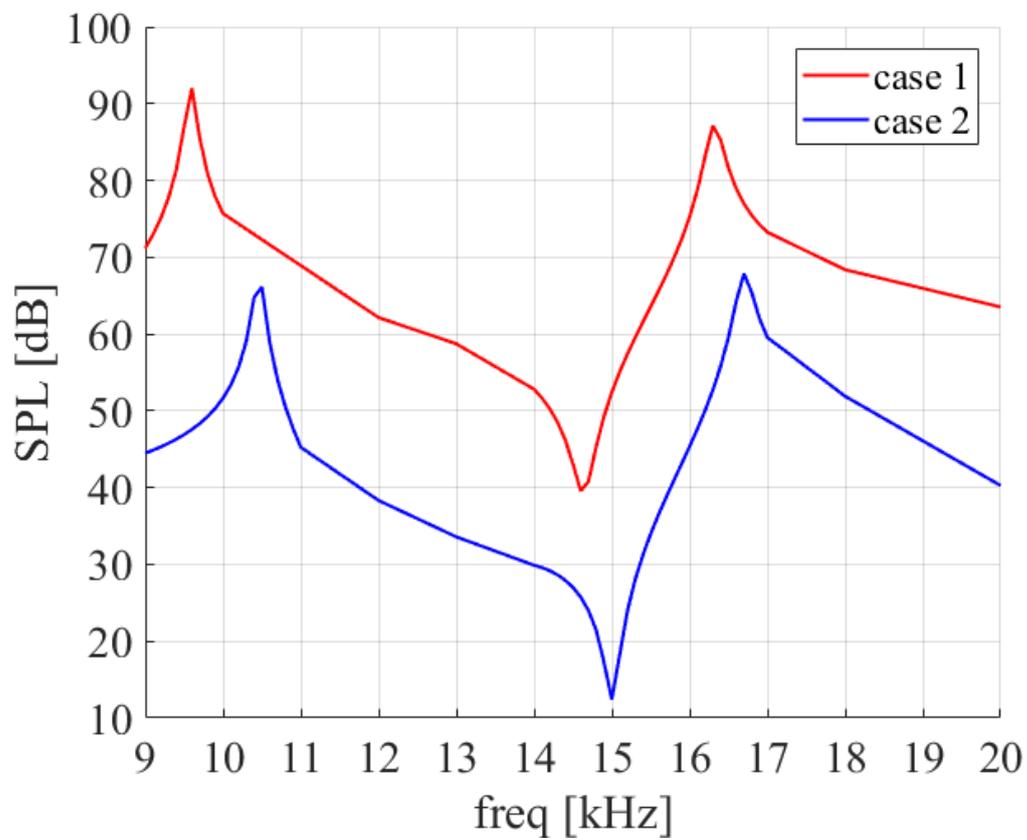


**Figura 5.23:** Risposta in frequenza del dispositivo attuato esclusivamente tramite gli elettrodi posti sulle molle.



**Figura 5.24:** Ampiezze e configurazioni di vibrazione del dispositivo. Rispettivamente a circa: A) 1,5 [kHz]; B) 10,8 [kHz]; C) 15 [kHz]; D) 16,8 [kHz].

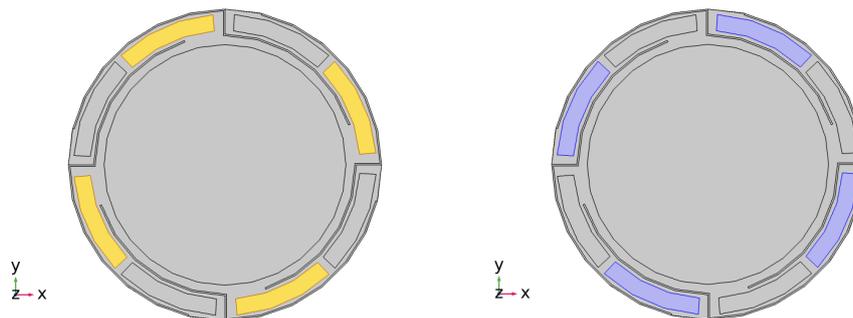
Infine, viene presentato un grafico di confronto delle prestazioni del dispositivo attuato nelle due differenti modalità. Si osserva che l'attuazione dell'elettrodo centrale consente maggiori livelli di emissione sonora. A discapito di questo modo di attuazione, però, solo frequenze dai 10 [kHz] in su emettono un buon livello di pressione acustica. Un vantaggio del secondo tipo di attuazione, infatti, risulta proprio essere l'attivazione di un modo a pistone alle basse frequenze (circa 1,5 [kHz]) che permette al dispositivo di ricoprire anche il ruolo di Woofer e non solo quello di Tweeter.



**Figura 5.25:** Confronto tra le curve di risposta in frequenza del dispositivo attuato nelle due diverse modalità. In rosso il modo in cui si attua l'elettrodo centrale, in blu quello in cui si attuano solamente gli elettrodi sulle molle che sostengono il diaframma.

#### 5.4.2.2 Stratigrafia proposta dall'azienda STMicroelectronics

Per quanto riguarda questo dispositivo le analisi sono state svolte con un solo tipo di attuazione. È stata utilizzata come tensione di attuazione di 15 [V] DC e 15 [V] AC. L'attuazione utilizzata non sfrutta l'elettrodo centrale ma attua in modo diretto ed inverso gli elettrodi presenti sulle molle che sostengono il diaframma, come mostrato in figura 5.26:

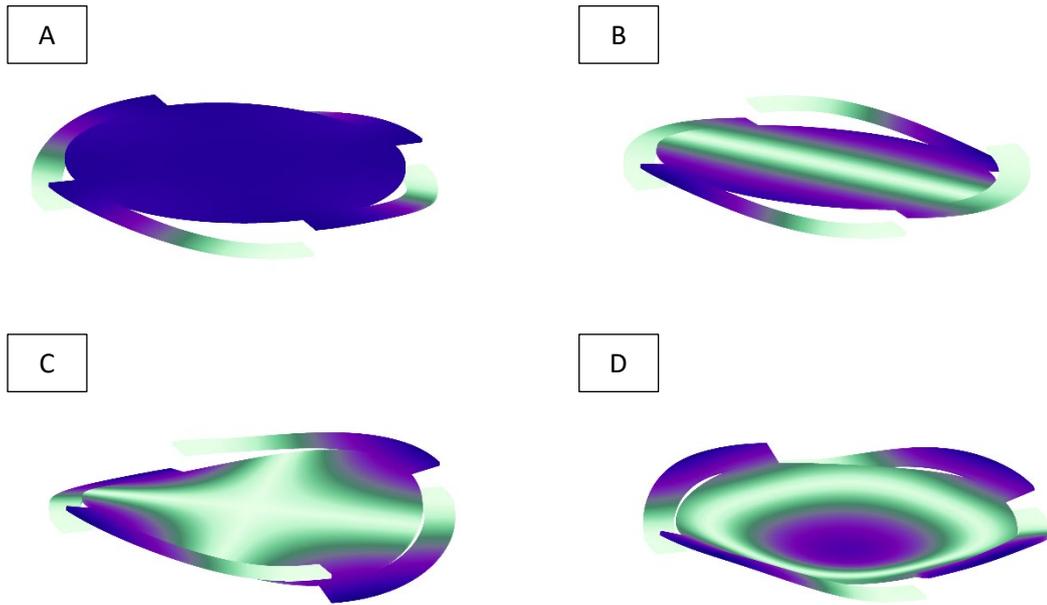


**Figura 5.26:** A sinistra, evidenziata in giallo, l'attuazione diretta degli elettrodi; a destra, in azzurro, l'attuazione inversa.

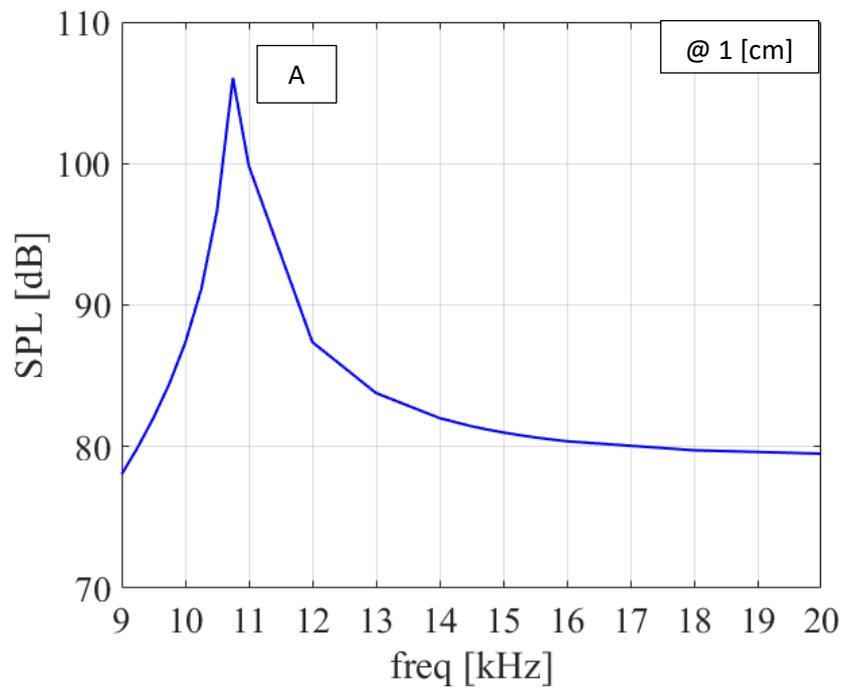
Dopo aver simulato l'attuazione del dispositivo, si osserva, dai risultati, che nella banda dell'udibile vengono stimolati solo due modi di vibrazione a 10.750 [kHz] e a 15 [kHz] che corrispondono, rispettivamente, ad un modo a pistone e ad un modo a specchio. Anche gli altri modi, che erano presenti nel modello con stratigrafia originale, sono ancora presenti ma sono spostati a frequenze decisamente maggiori. Questo fenomeno è dovuto ad un irrigidimento del diaframma dato dalla nuova stratigrafia utilizzata nel modello. Inoltre, si ricorda che in questo caso la configurazione di partenza non è quella ideale ma è deformata a causa degli sforzi residui presenti nei materiali.

La pressione sonora viene misurata sia alla distanza di 1 [cm] che alla distanza di 10 [cm]. In tutti e due i casi essa raggiunge il massimo in corrispondenza del modo a pistone. Nel primo caso si ha un valore massimo di 106 [dB], nel secondo caso questo valore raggiunge gli 86 [dB].

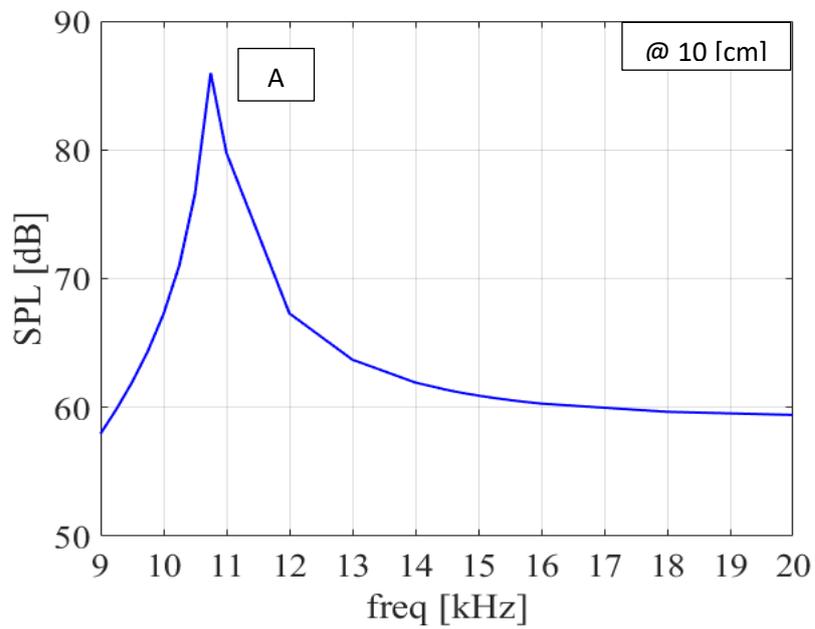
Nella seguenti figure vengono mostrati rispettivamente: modi di risonanza del dispositivo (5.27); risposta in frequenza alla distanza di 1 [cm] (5.28); risposta in frequenza alla distanza di 10 [cm] (5.30); confronto tra le risposte in frequenza (5.29).



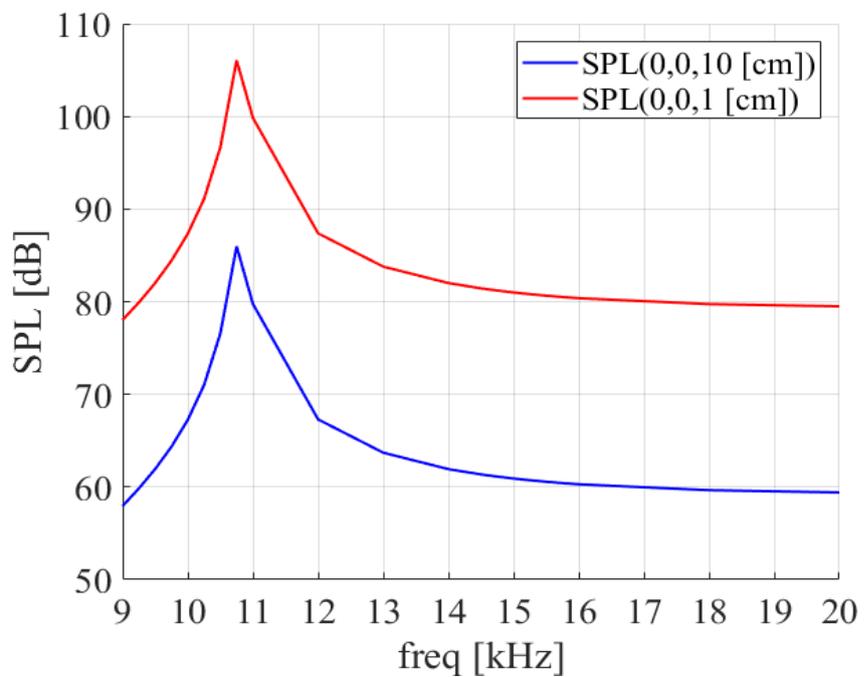
**Figura 5.27:** Modi di risonanza della membrana. A) Modo a pistone: 10,750 [kHz]; B) Modo a specchio: 15 [kHz]; C) Modo a sella: 45 [kHz]; D) Modo a tamburo: 78 [kHz].



**Figura 5.28:** Curva di SPL generata dal dispositivo a distanza di 1 [cm]. Il modo a specchio non viene attivato. Livello massimo raggiunto: 106 [dB].



**Figura 5.29:** Curva di SPL generata dal dispositivo a distanza di 10 [cm]. Il modo a specchio non viene attivato. Livello massimo raggiunto:86 [dB].



**Figura 5.30:** Confronto tra le curve di emissione acustica a 10 [cm] e ad 1 [cm].

## 5.5 Quadrifoglio

Dopo aver riprodotto e studiato i modelli, presi come riferimento, dell'Istituto Fraunhofer e dell'Università di Taiwan, si è passati alla fase di ideazione e modellazione di nuove geometrie che possano migliorare le prestazioni dei dispositivi studiati.

Il processo di ideazione, come anticipato nel capitolo 2.3, ha tratto ispirazione dal mondo dei kirigami ed è stato facilitato dall'esperienza accumulata precedentemente nella modellazione dei dispositivi di riferimento.

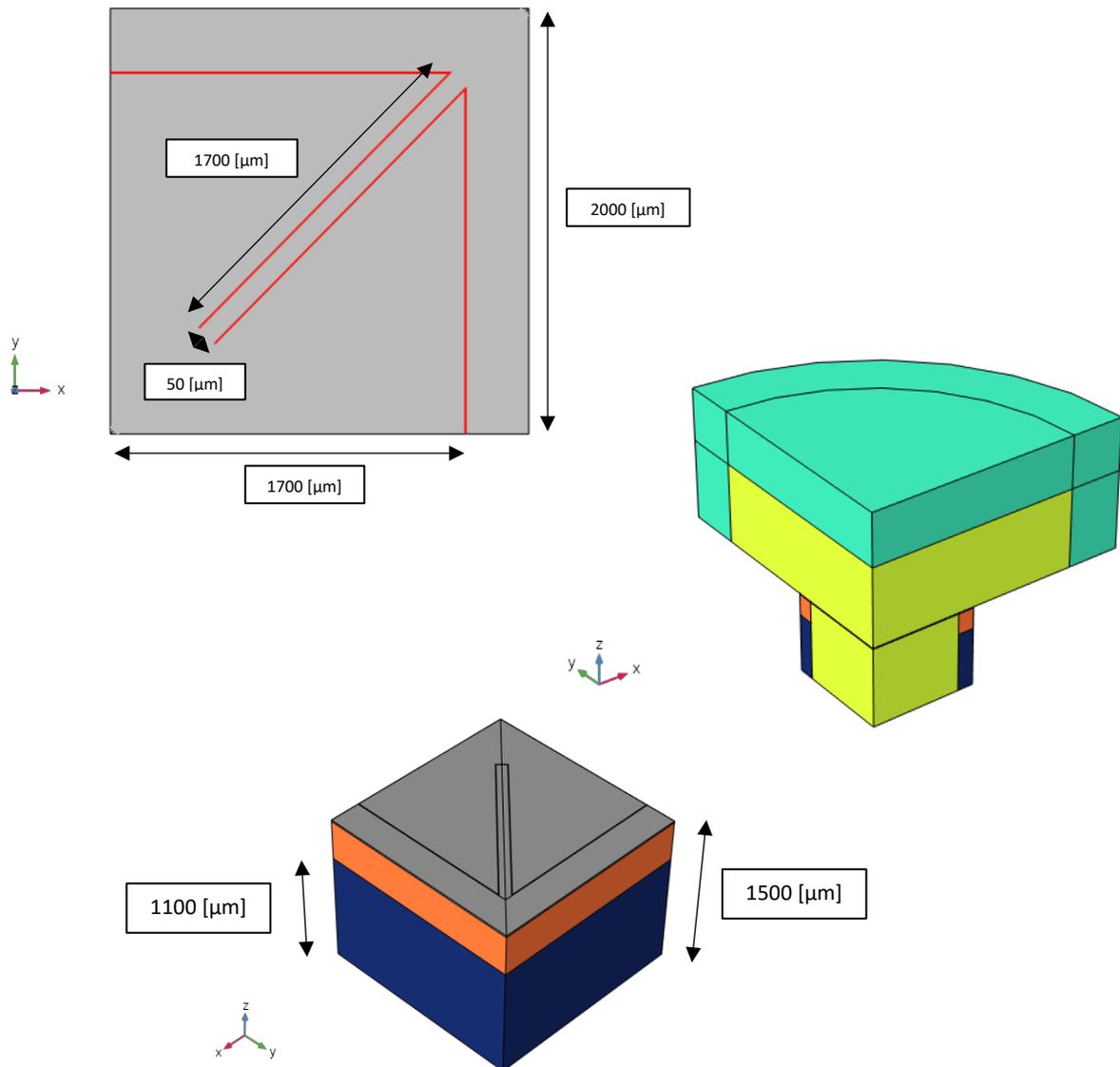
I tre modelli presentati di seguito sono tre variazioni significative della stessa geometria di base; in tutti i modelli è stata utilizzata attuazione piezoelettrica con stratigrafia, comprensiva di dati su materiali e sforzi residui, fornita gentilmente dall'azienda STMicroelectronics.

### 5.5.1 Modellazione e Mesh

Il primo modello che è stato ideato è costituito da un diaframma sostenuto da quattro travi poste sulle diagonali. Per una questione di confronto, e proprio per migliorare le prestazioni dei dispositivi già studiati, si è provato a mantenere l'estensione della struttura proposta dall'Istituto Fraunhofer ( $4 \times 4$  [mm<sup>2</sup>]) cercando però di favorire la presenza di due modi di vibrazione utili nella banda dell'udibile, disposti in modo tale che il dispositivo possa funzionare su tutta la banda, quindi sia come tweeter che come woofer.

In figura 4.30 viene presentata la configurazione ideata, evidenziando in rosso le fenditure, larghe 5 [μm], che danno mobilità alla struttura. Passando al dimensionamento della struttura si può dire che le travi a sostegno del diaframma sono larghe 50 [μm] e lunghe 1700 [μm]. Per quanto riguarda il diaframma, che è la parte che sposta il volume d'aria, esso risulta essere un quadrato di lato 3400 [μm], lasciando quindi 300 [μm] di margine esterno. Questa cornice esterna, larga 300 [μm], viene poi estrusa ortogonalmente rispetto al piano del dispositivo in modo da andare a costituire le pareti laterali della cavità retrostante al dispositivo; in particolare si modellano 400 [μm] di Silicio monocristallino che costituiscono il wafer in SOI e 1100 [μm] di Nylon, scelto in quanto polimero utilizzabile in elettronica e che si presta all'additive manufacturing. La lunghezza totale della cavità risulta quindi essere esattamente la stessa della cavità presentata nel modello proposto dall'Istituto Fraunhofer ISIT. Anche i restanti domini d'aria sono modellati esattamente come quelli del modello preso a riferimento per la modellazione di questa tipologia di dispositivi.

Lo studio viene effettuato solamente su una porzione (un quarto) del dispositivo vista la sua configurazione simmetrica, per questo motivo anche le rappresentazioni seguenti mostrano solamente la parte studiata.

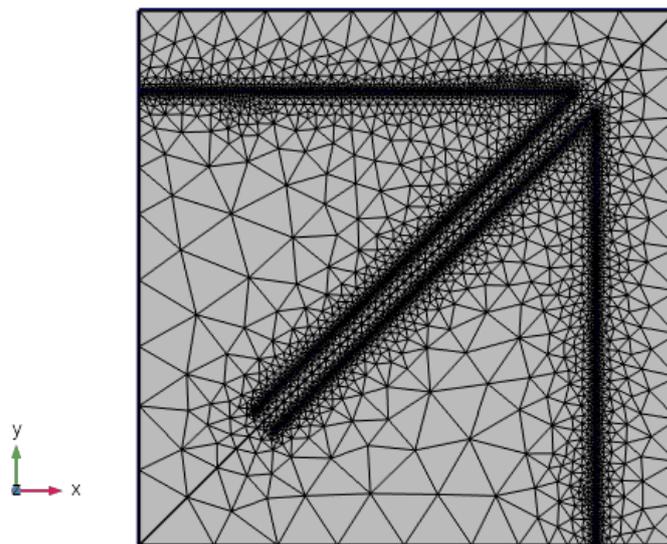


**Figura 5.31:** Presentazione della geometria ideata. In alto la configurazione del diaframma con evidenziati in rosso gli intagli; in mezzo i domini d'aria evidenziati in giallo e i domini a cui viene assegnata la condizione di PML in azzurro; da ultimo un dettaglio degli strati di Nylon (blu scuro) e Silicio monocristallino (arancione).

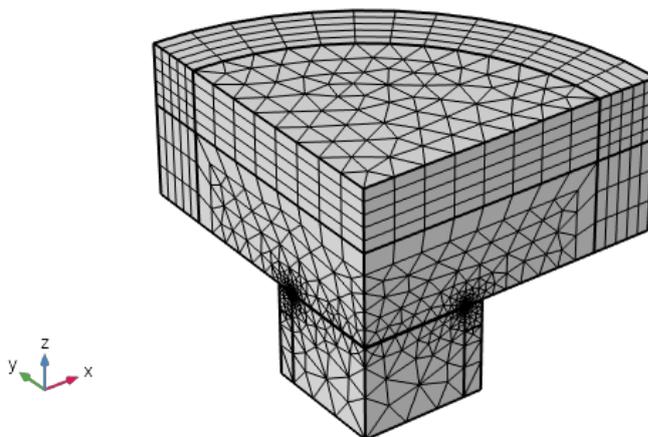
Per quanto riguarda la discretizzazione ad elementi finiti dei domini, si è seguito esattamente lo stesso procedimento e gli stessi tipi di elementi che vengono utilizzati nel modello di riferimento.

La dimensione massima degli elementi imposta sulla superficie del diaframma è pari ad un decimo del lato del microspeaker, quindi  $400\ [\mu\text{m}]$ ; la dimensione minima degli elementi, invece, è posta pari alla metà della larghezza delle fenditure, quindi  $2,5\ [\mu\text{m}]$ .

Per completezza si riportano le immagini (5.32 e 5.33) della suddivisione ad elementi finiti del diaframma e della geometria intera.



**Figura 5.32:** Discretizzazione in elementi finiti del diaframma del dispositivo “Quadrifoglio”.



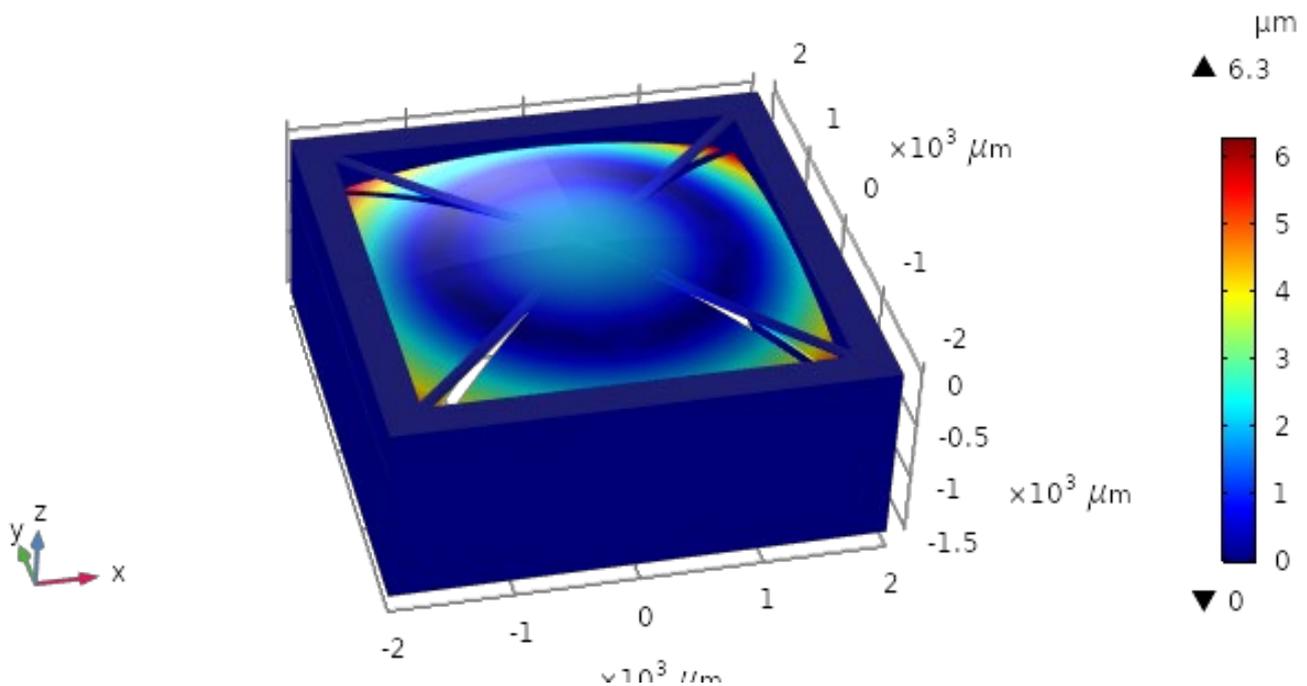
**Figura 5.33:** Discretizzazione in elementi finiti di tutto il modello del dispositivo “Quadrifoglio”.

## 5.5.2 Risultati delle analisi

Per poter analizzare le prestazioni del dispositivo e confrontarle con quelle dei dispositivi precedentemente analizzati, si sono svolte le stesse analisi eseguite per i modelli precedenti. In particolare, a seguire, vengono presentati: la configurazione di riferimento del dispositivo, le frequenze di risonanza trovate tramite analisi puramente elettro-meccanica e i grafici di SPL generata dal dispositivo.

### 5.5.2.1 Configurazione di riferimento

Come già visto, la configurazione di riferimento è data dagli stress residui nei materiali dopo la loro deposizione. In questo caso la deformazione dalla configurazione ideale è riportata in figura 5.34. Si registra una deflessione massima di 6.3 [ $\mu\text{m}$ ].

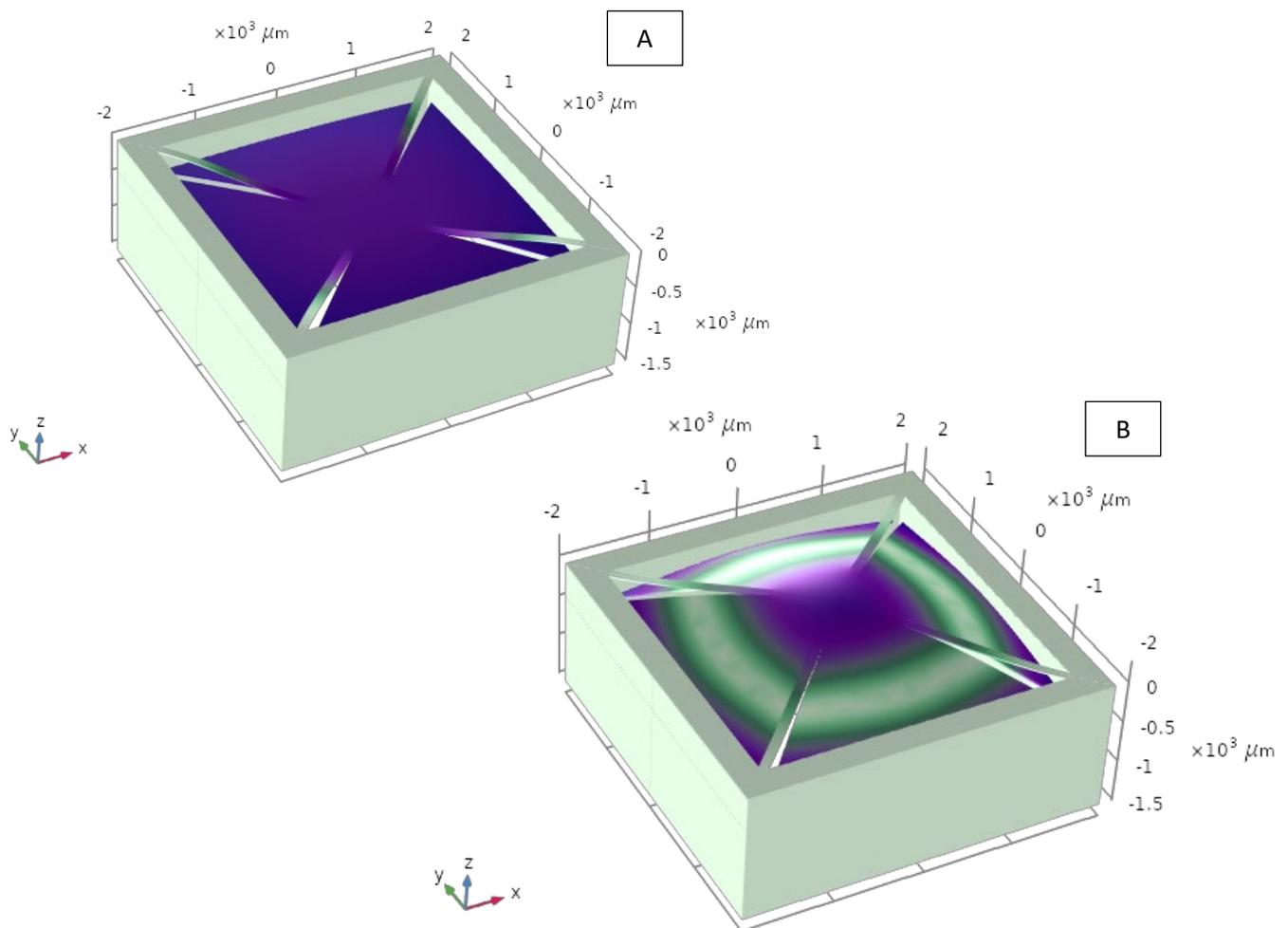


**Figura 5.34:** Configurazione di riferimento del dispositivo “Quadrifoglio” dovuta agli sforzi residui nei vari strati di materiali depositati.

### 5.5.2.2 Analisi dei modi di vibrazione

È stata fatta un'analisi modale per vedere a che frequenze fossero i modi di risonanza della struttura. In realtà questa è stata la prima analisi fatta sulla struttura in modo tale da posizionare i modi di vibrazione sia alle alte che alle basse frequenze variando parametri fondamentali del dispositivo come, ad esempio, spessore e larghezza delle travi che sostengono il diaframma. In tal modo si cerca di ottimizzare un dispositivo che sia allo stesso tempo tweeter e woofer.

Di seguito vengono riportati graficamente i dati trovati con l'analisi modale. Si sono osservati due modi di vibrazione principali: un modo a pistone a 1,55 [kHz]; un modo a tamburo a 10,6 [kHz].

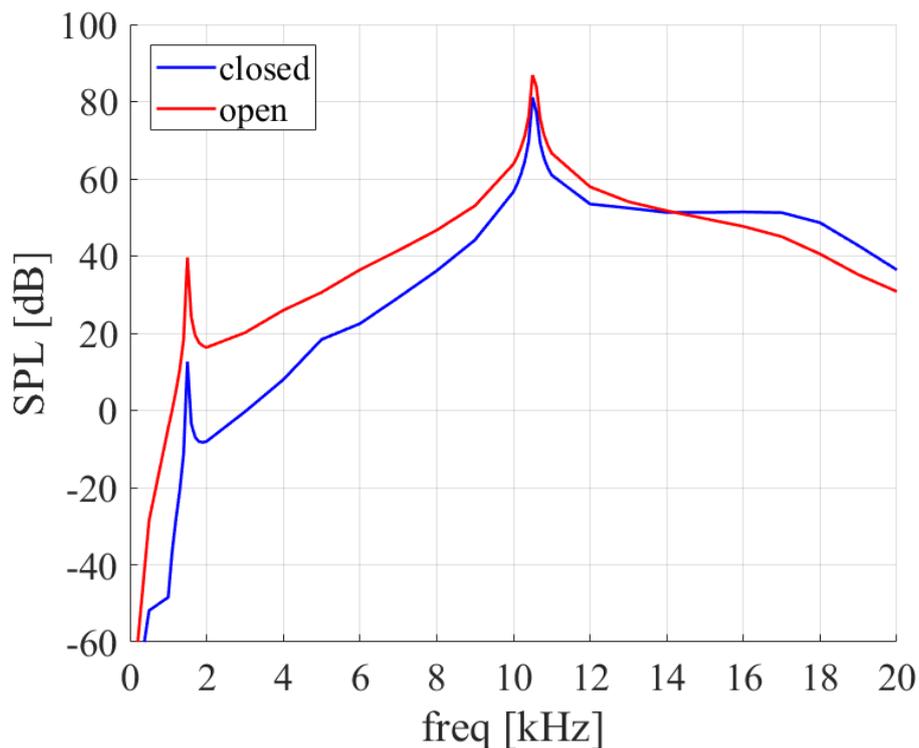


**Figura 5.35:** Modi di vibrazione del dispositivo “Quadrifoglio”. A) Modo a pistone, 1.55 [kHz]; B) Modo a tamburo, 10.6 [kHz].

### 5.5.2.3 Risposta in frequenza dell'intensità acustica

La risposta in frequenza del livello di pressione acustica generata dal dispositivo viene calcolata con un'attuazione di 1 [V] DC e 1 [V] AC. Tale misura viene effettuata a 10 [cm] di distanza dalla membrana ed è chiaramente influenzata dalla sua configurazione di riferimento. Sono state fatte le stesse analisi considerando sia il caso in cui la cavità posteriore al dispositivo sia chiusa (come nel caso di libreria del dispositivo dell'Istituto Fraunhofer), sia considerando la cavità aperta, idea derivante dagli articoli relativi ai dispositivi ideati presso l'università di Taiwan. . Il caso di cavità chiusa impone sulla parete inferiore del dominio d'aria sottostante al dispositivo l'equazione [4.22] con secondo termine nullo, ossia la componente dell'accelerazione dell'onda acustica su quella superficie è nulla. Non c'è propagazione. Nel caso di cavità aperta, invece, all'onda acustica generata è permessa la propagazione.

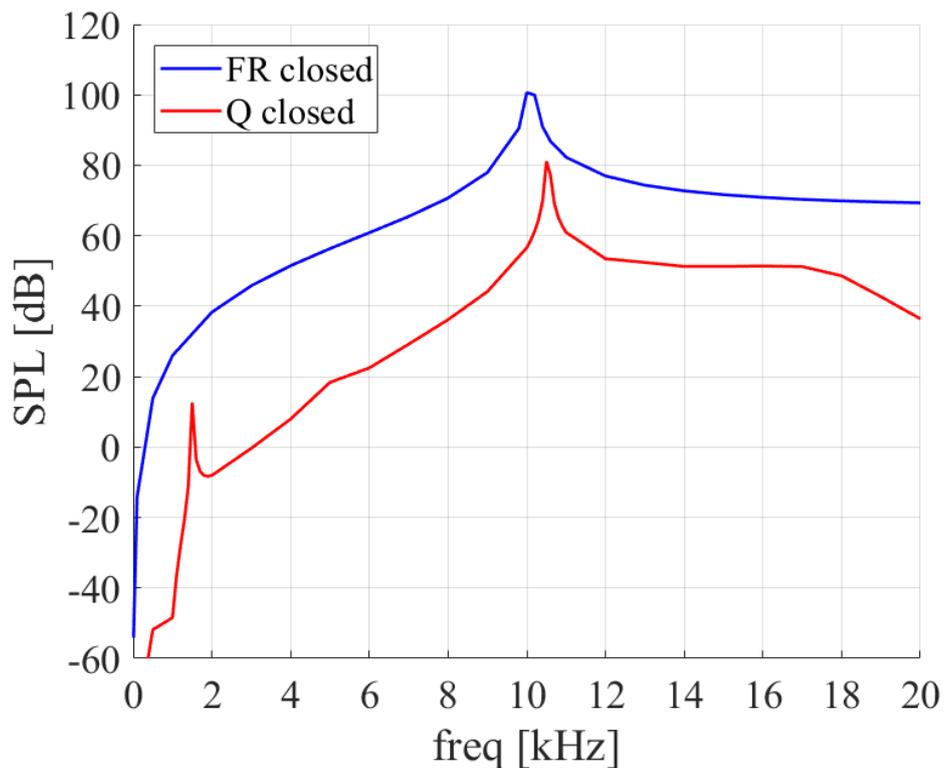
I risultati sono stati confrontati in seguito con i risultati dati dalle stesse misure svolte sul dispositivo dell'Istituto Fraunhofer.



**Figura 5.36:** Risposta in frequenza del dispositivo “Quadrifoglio” attuatato con 1 [V] DC e 1 [V] AC, misurata a 10 [cm] di distanza e considerando la cavità acustica aperta (curva rossa) e chiusa (curva blu).

Da questo primo grafico di risposta in frequenza (figura 5.36), si nota che la cavità aperta permette valori di SPL generata più alti su quasi tutta la banda dell'udibile. Sono ben contraddistinti i picchi relativi alle frequenze di risonanza e il valore massimo di pressione acustica generata è di circa 88 [dB] in corrispondenza del modo a tamburo con cavità aperta; per quanto riguarda la curva che rappresenta il dispositivo con cavità chiusa, invece, il massimo è raggiunto sempre in corrispondenza del modo a tamburo per un valore di circa 80 [dB].

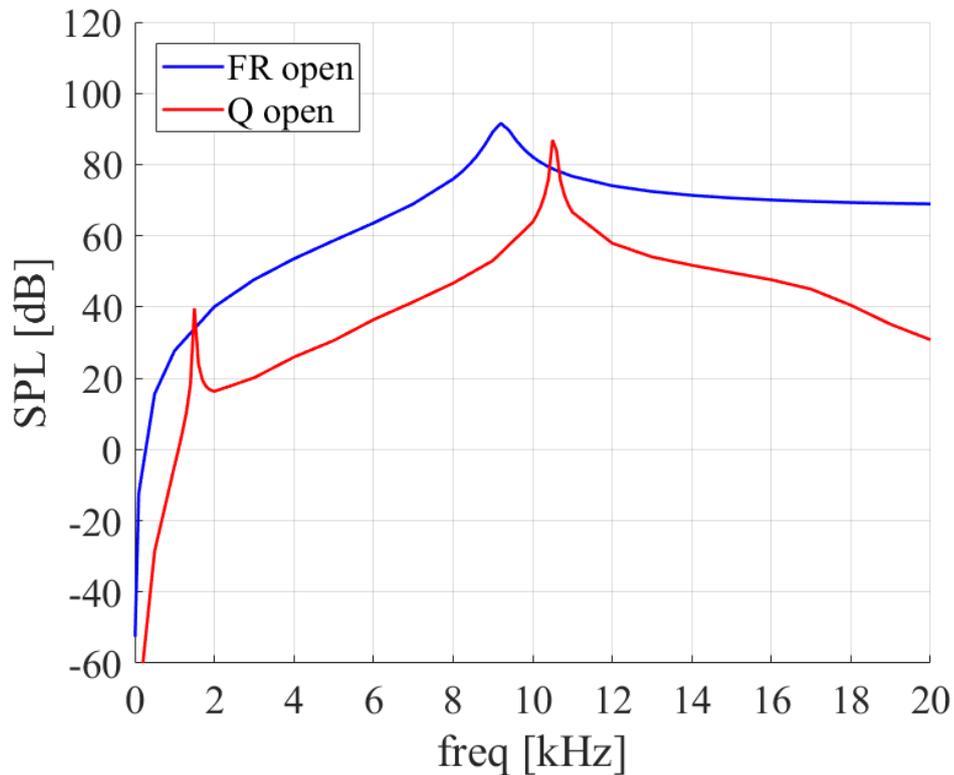
Viene poi fatto il confronto, a parità di condizioni di test, con il dispositivo dell'Istituto Fraunhofer. In un primo momento per i casi in cui la cavità viene considerata chiusa (figura 5.37).



**Figura 5.37:** Confronto tra le risposte in frequenza, a parità di condizioni di test, per il tweeter dell'Istituto Fraunhofer e il modello ideato: “Quadrifoglio” considerando la cavità acustica chiusa.

Dal confronto risulta evidente che le prestazioni del dispositivo ideato dai ricercatori tedeschi risultano essere migliori su tutta la banda dell'udibile.

Si considerano poi le stesse misurazioni, ma effettuate per i dispositivi con cavità aperta. Di seguito il grafico che presenta i risultati (figura 5.38).



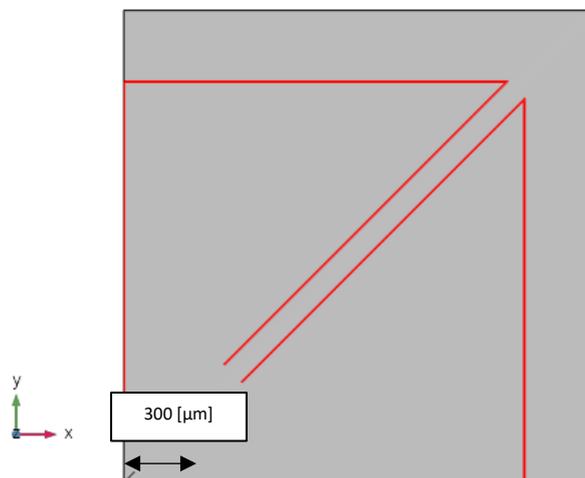
**Figura 5.38:** Confronto tra le risposte in frequenza, a parità di condizioni di test, per il tweeter dell’Istituto Fraunhofer e il modello ideato: “Quadrifoglio” considerando la cavità acustica aperta.

Dal confronto risulta che il dispositivo “Quadrifoglio” presenta dei picchi che riescono a migliorare localmente le prestazioni del dispositivo dell’Istituto Fraunhofer solo a determinate frequenze, generalmente la curva della risposta in frequenza rimane al di sotto della curva di riferimento di circa 20 [dB].

## 5.6 Quadrifoglio con intagli

La struttura studiata in questo paragrafo modifica leggermente quella precedentemente presentata. Dal momento che le variazioni apportate alla geometria sono minime, la modellazione e la discretizzazione ad elementi finiti verranno ripercorsi velocemente semplicemente integrando laddove necessario quello che è stato detto per il modello precedente.

Basandosi sulle misure effettuate per il primo modello, e volendo incrementare l'emissione acustica nella banda dell'udibile, si è pensato di utilizzare lo stesso approccio del dispositivo studiato nello stato dell'arte, sviluppato dall'Università di Taiwan. La novità che si vuole introdurre, infatti, è quella di avvicinare (a livello di frequenze) i modi di vibrazione della struttura in modo da avere un livello medio maggiore tra i due picchi. Questo significa che bisogna aumentare la frequenza di risonanza del modo a pistone o abbassare la frequenza di risonanza del modo a tamburo. Per diminuire la frequenza di risonanza del modo a tamburo si deve agire sulla struttura in modo tale che essa risulti meno rigida, per ottenere ciò si è deciso di effettuare degli intagli (riportati in figura 5.39) a metà dei quattro petali del "Quadrifoglio" senza però arrivare al centro del dispositivo, ma lasciando una zona di connessione centrale. In figura è riportato un quarto del diaframma con evidenziate in rosso le fenditure e riportate le dimensioni non note del dispositivo, tutte le dimensioni non esplicitate di seguito sono già state riportate nel capitolo precedente.



**Figura 5.39:** Geometria di un quarto di dispositivo con intagli evidenziati in rosso.

Zona di congiunzione centrale di lato 600 [μm] sul dispositivo totale.

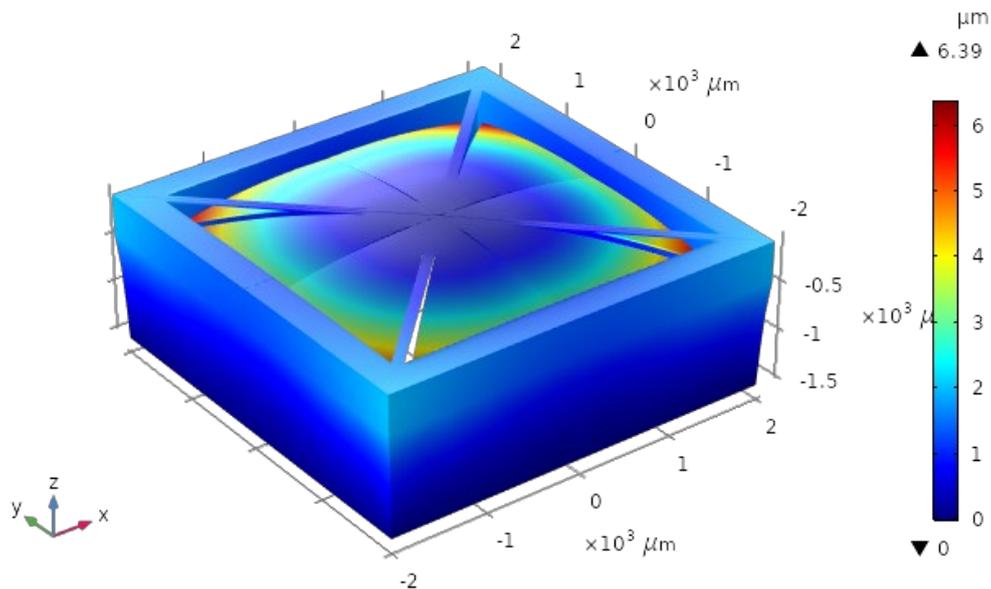
Tutti gli aspetti di discretizzazione e completamento del modello, come ad esempio gli strati di Nylon e di Silicio monocristallino e i domini d'aria, rimangono invariati rispetto al modello precedente. Per brevità si preferisce non riportarli e si rimanda al capitolo 5.5.

## 5.6.1 Risultati delle analisi

Per avere un confronto diretto con modelli già studiati si sono effettuate le stesse analisi dei modelli precedenti. Di seguito vengono riportati i risultati.

### 5.6.1.1 Configurazione di riferimento

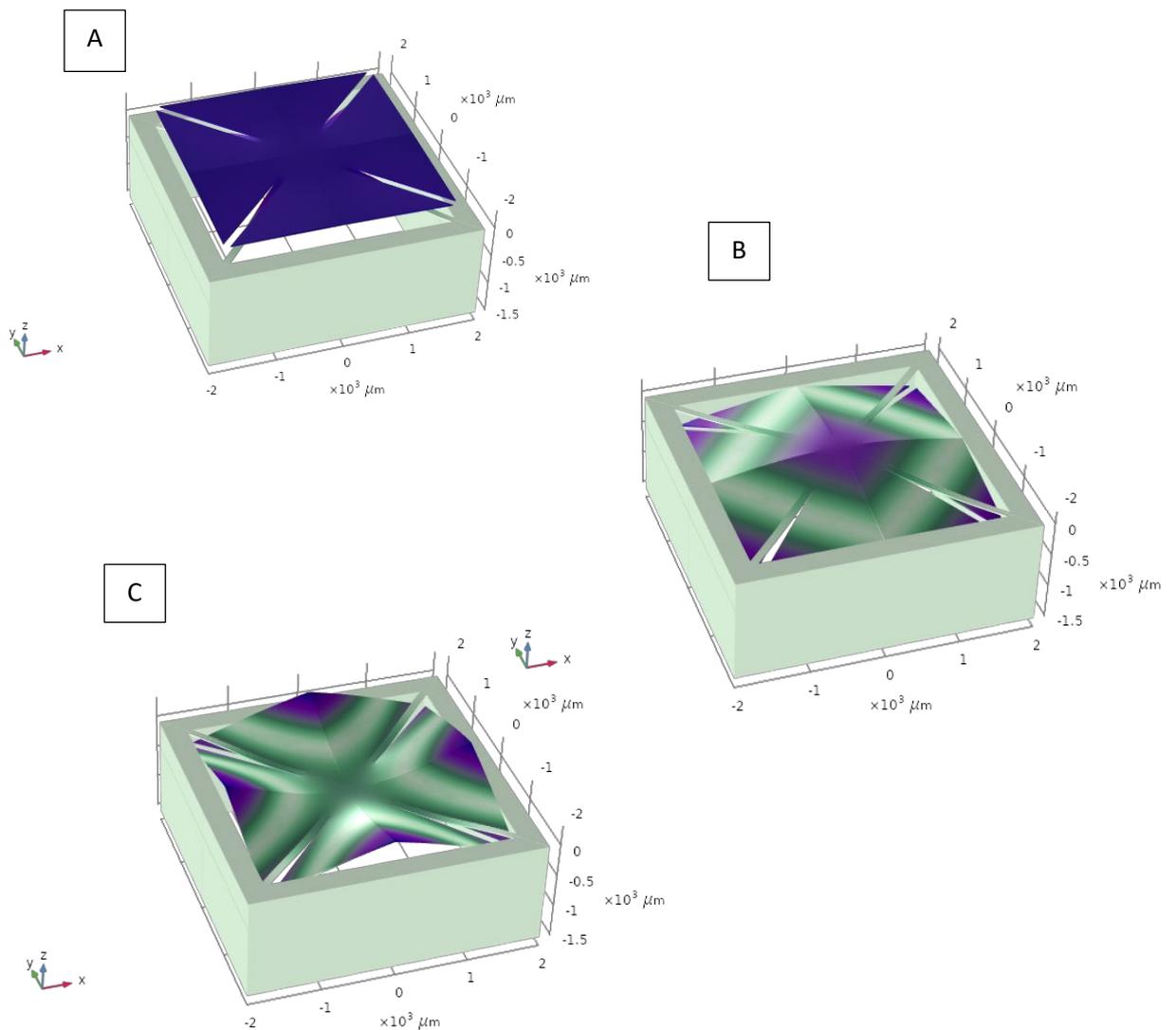
Anche in questo modello, tramite uno studio stazionario, si è ottenuta la deformata di partenza del sistema. Come ci si poteva aspettare, essa è molto simile al caso precedente sia come disposizione spaziale che come valori di riferimento. In questo caso la deflessione massima ottenuta dallo studio fatto considerando gli sforzi residui è di  $6.39 \text{ } [\mu\text{m}]$ .



**Figura 5.40:** Configurazione di riferimento del dispositivo “Quadrifoglio con intagli”.

### 5.6.1.2 Analisi dei modi di vibrazione

Come detto introducendo il capitolo, lo scopo dell'introduzione dei tagli è quello di rendere più flessibile la struttura e abbassare la frequenza del modo di vibrazione a tamburo. Dall'analisi modale risulta che questo è possibile, infatti l'introduzione degli intagli abbassa la frequenza del modo a tamburo fino a 7,11 [kHz]. La frequenza del modo a pistone rimane invariata a 1.54 [kHz]. Si trova un terzo modo nella banda dell'udibile che, come si vedrà poi nelle curve di risposta in frequenza, risulta utile all'emissione acustica. Quest'ultimo modo si trova a 17.4 [kHz] ed è un modo a sella.

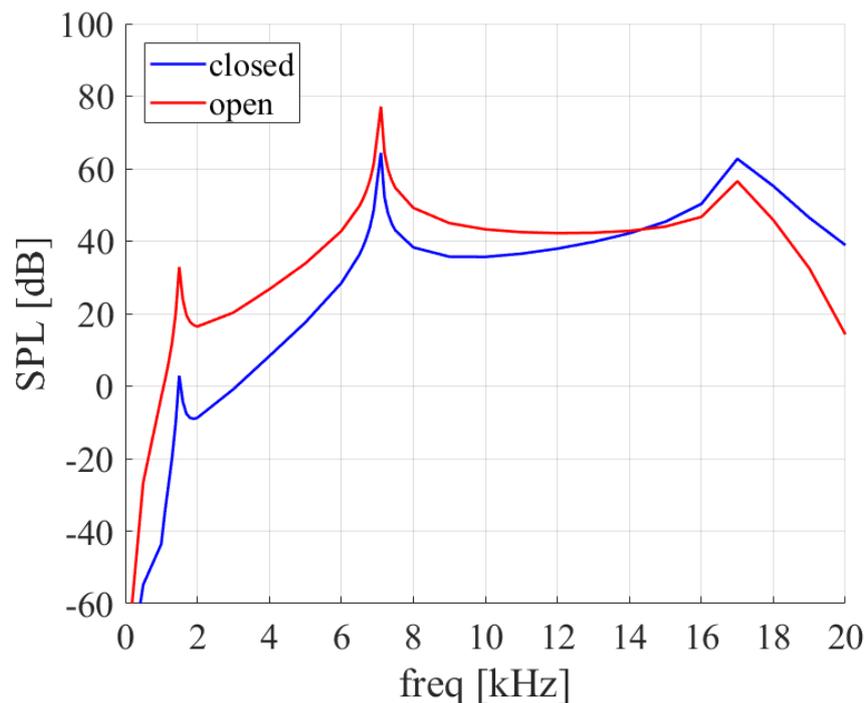


**Figura 5.41:** A) Modo di vibrazione a pistone, 1.54 [kHz]; B) Modo di vibrazione a tamburo, 7.11 [kHz]; C) Modo a sella, 17.4 [kHz].

### 5.6.1.3 Risposta in frequenza dell'intensità acustica

Come nello studio relativo al dispositivo precedente si sono confrontate le prestazioni acustiche del modello "Quadrifoglio con intagli" con il modello di riferimento dell'Istituto Fraunhofer. Anche in questo caso si sono distinti i due casi che prevedono la cavità acustica retrostante il dispositivo aperta o chiusa. L'attuazione è sempre di 1 [V] DC + 1 [V] AC.

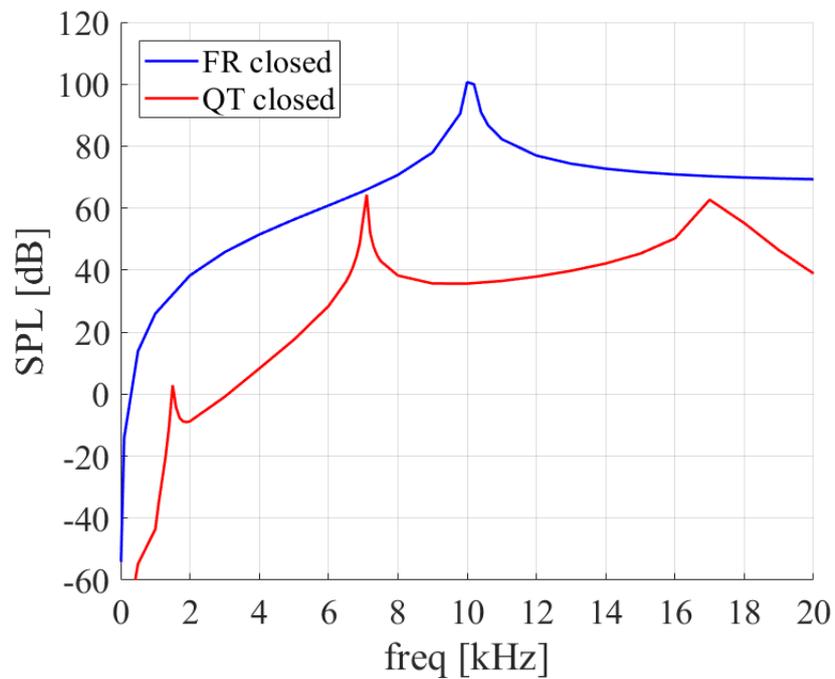
I risultati sono riportati di seguito:



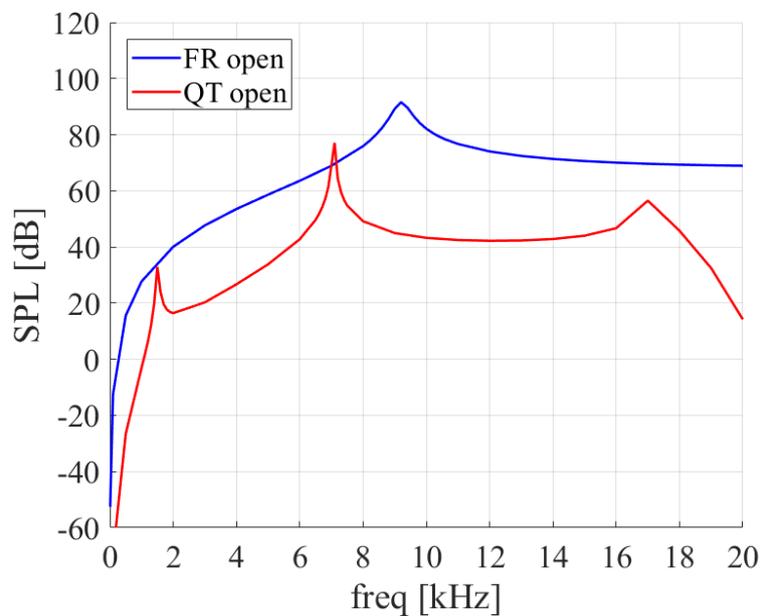
**Figura 5.42:** Curva di risposta in frequenza del dispositivo. I picchi da sinistra a destra corrispondono ai modi di vibrazione: a pistone, a tamburo, a sella.

Come riportato in figura 5.42, l'emissione acustica del dispositivo ha il proprio massimo, sia con cavità aperta che con cavità chiusa, in corrispondenza del modo a tamburo. A questa frequenza il dispositivo raggiunge intensità sonore rispettivamente di 78 [dB] e 62 [dB] a seconda che la cavità sia aperta o chiusa. Il terzo modo che appare nella banda dell'udibile ha l'effetto gradito di mantenere la curva di emissione alta e relativamente piatta dopo il secondo picco di risonanza.

Per quanto riguarda il confronto con il dispositivo proposto dai ricercatori dell'Istituto Fraunhofer, i grafici sono riportati di seguito in figura 5.43 e figura 5.44.



**Figura 5.43:** Confronto di prestazioni tra i dispositivi presi in considerazione, mantenendo la cavità acustica chiusa.

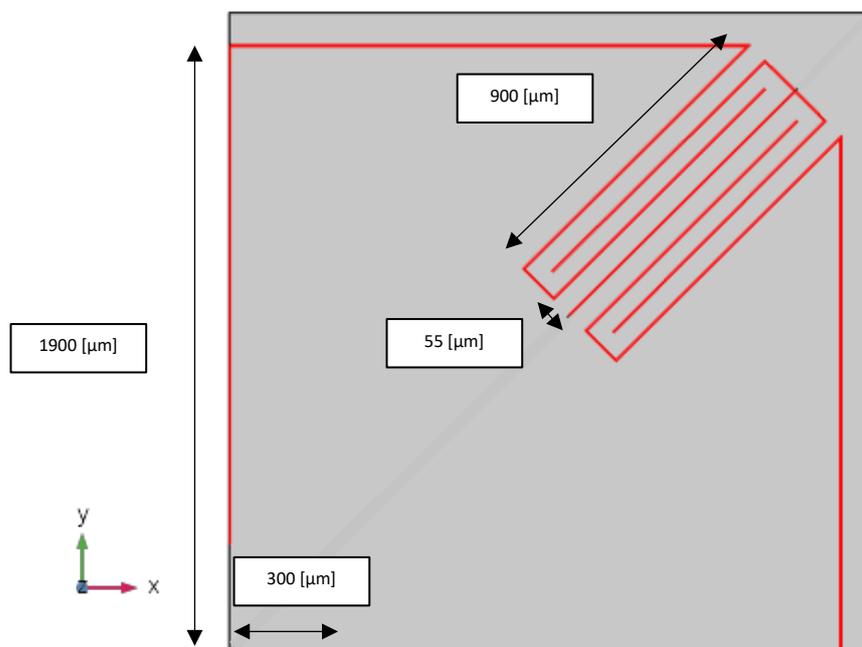


**Figura 5.44:** Confronto di prestazioni tra i dispositivi presi in considerazione, mantenendo la cavità acustica aperta.

Come nel caso precedente le prestazioni del dispositivo sono inferiori a quelle del microspeaker preso a riferimento. Si è riusciti comunque nell'intento di avvicinare i primi due modi di vibrazione e si è introdotto un terzo modo di vibrazione che permette di mantenere alta la curva di emissione acustica del dispositivo anche oltre il picco di risonanza del tweeter. Si conferma il fatto che mantenere la cavità acustica retrostante al dispositivo aperta permette di avere livelli più alti di pressione sonora emessa.

## 5.7 Quadrifoglio con intagli e molle piegate

L'ultimo dispositivo che si è studiato è un'ulteriore variazione del dispositivo "Quadrifoglio". In questo caso, oltre ad aver mantenuto gli intagli presenti nel dispositivo precedente, sono state modificate le travi a sostegno del diaframma centrale. Si è deciso, infatti, di introdurre delle molle piegate in modo tale da avere una struttura più affidabile del singolo cantilever e che garantisca comunque un'ottima flessibilità al dispositivo. In figura 5.45 viene riportato un quarto della geometria con evidenziati in rosso gli intagli presenti nel dispositivo. Le dimensioni del dispositivo prevedono, come sempre una pianta di  $4 \times 4$  [ $\text{mm}^2$ ], delle molle piegate lunghe  $900$  [ $\mu\text{m}$ ] e con un singolo braccio della molla largo  $55$  [ $\mu\text{m}$ ]. La lunghezza del lato del diaframma è stata incrementata da  $1700$  [ $\mu\text{m}$ ] fino a  $1900$  [ $\mu\text{m}$ ].



**Figura 5.45:** Configurazione "Quadrifoglio con intagli e molle piegate".

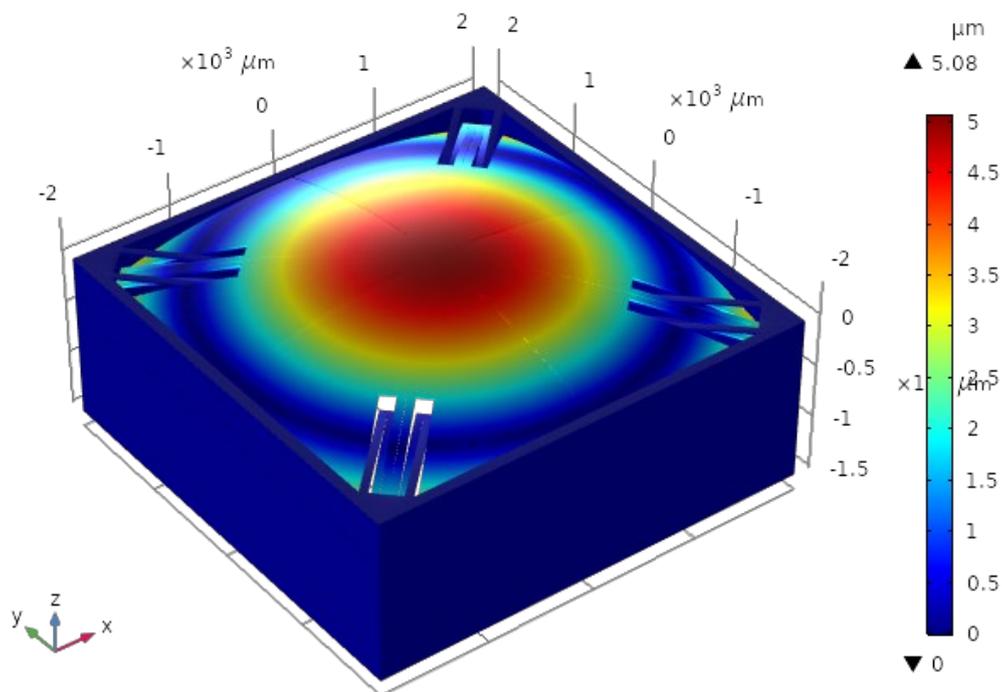
Come riportato anche nel capitolo precedente, tutti gli aspetti di discretizzazione e completamento del modello, come ad esempio gli strati di Nylon e di Silicio monocristallino e i domini d'aria, rimangono invariati rispetto al modello precedente. Per brevità si preferisce non riportarli e si rimanda al capitolo 5.5.

## 5.7.1 Risultati delle analisi

Anche in quest'ultimo caso, per avere un confronto diretto con modelli già studiati, si sono effettuate le stesse analisi dei modelli precedenti. Di seguito vengono riportati i risultati.

### 5.7.1.1 Configurazione di riferimento

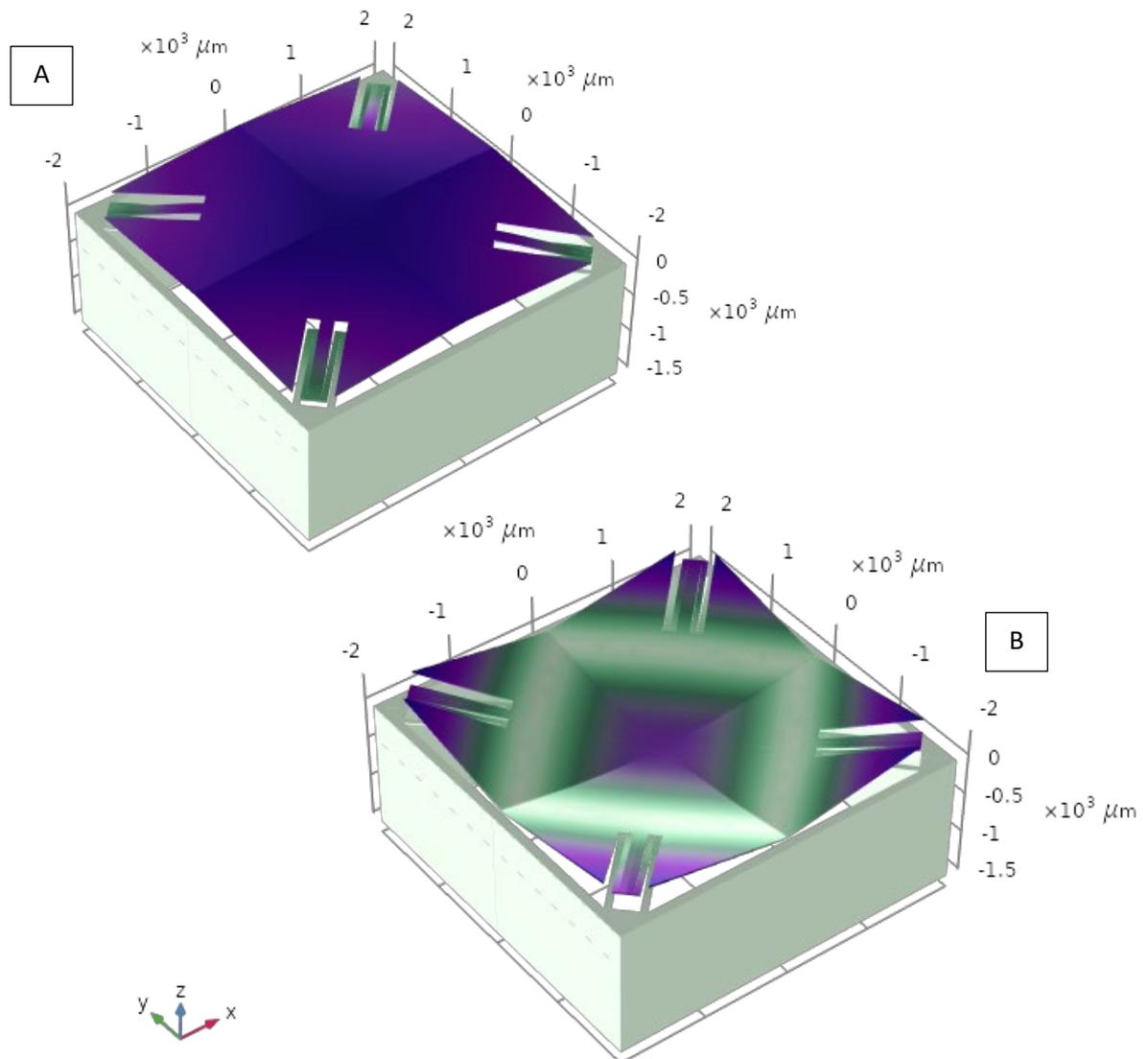
Come nei modelli precedenti si è studiata l'influenza degli stress residui sulla conformazione iniziale del dispositivo. Lo scostamento massimo trovato per la configurazione iniziale in questo caso vale  $5,08 \text{ } [\mu\text{m}]$ .



**Figura 5.46:** Configurazione di riferimento data dagli stress residui presenti negli strati dei vari materiali.

### 5.7.1.2 Analisi dei modi di vibrazione

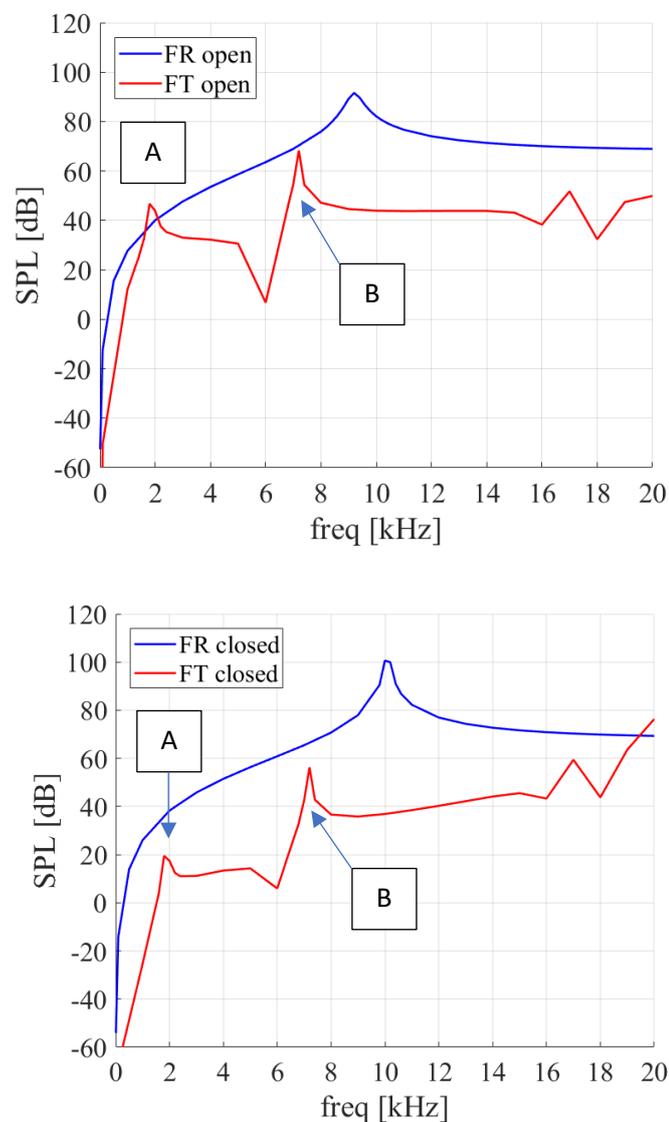
Anche in questo caso si ritrovano un modo a pistone, ad una frequenza di 1.94 [kHz] e un modo a tamburo ad una frequenza di 7.2 [kHz]. Quindi si ha un ulteriore avvicinamento dei due modi di vibrazione principali del dispositivo. Non si riscontrano ulteriori modi di vibrazione utili alla propagazione sonora a differenza del caso precedente.



**Figura 5.47:** Modi di vibrazione del diaframma. A) Modo a pistone, 1.94 [kHz]; B) Modo a tamburo, 7.2 [kHz].

### 5.7.1.3 Risposta in frequenza dell'intensità acustica

Anche in questo modello è stata studiata e confrontata con il modello di riferimento la risposta in frequenza alla distanza di 10 [cm] utilizzando un'attuazione di 1 [V] DC e 1 [V] AC sia nel caso di cavità aperta che nel caso di cavità chiusa. I risultati ottenuti sono mostrati nella seguente figura (5.48). Il livello di pressione acustica generata dal dispositivo in tutti e due i casi è moderato, non vengono raggiunti i 70 [dB] in alcun punto della banda dell'udibile. Risultato interessante, però, è la forma della curva che risulta essere piatta in larghi tratti del range dell'udibile.



**Figura 5.48 (a,b):** Risposta in frequenza del dispositivo “Quadrifoglio con intagli e molle piegate”. (a) con cavità aperta (b) con cavità chiusa.



# 6

## CONCLUSIONI

In questo elaborato sono stati presentati vari modelli per simulare il comportamento e le prestazioni di alcuni microspeakers.

Il primo modello analizzato, descritto nel dettaglio e preso come riferimento per la creazione dei modelli successivi, è stato costruito sulla base della struttura presentata nell'articolo [15] dai ricercatori dell'Istituto Fraunhofer ISIT. Questo dispositivo, con una stratigrafia molto semplice, attuato con 1 [V] DC e 0.2 [V] AC, fornisce una risposta in frequenza, calcolata a 10 [cm] lungo la direzione ortogonale al piano su cui giace il dispositivo e passante per il centro di esso, che raggiunge il suo massimo alla frequenza di risonanza del sistema, 9 [kHz], arrivando ad un valore di picco di 80 [dB].

In secondo luogo, è stato modellato un dispositivo con la stessa geometria del precedente ma modificando la stratigrafia utilizzando i dati gentilmente forniti dall'azienda STMicroelectronics. Dallo studio della configurazione di riferimento del dispositivo data dalla presenza di sforzi residui all'interno dei materiali stratificati deriva che la struttura ha una deformazione iniziale la cui deflessione massima raggiunge un valore di 6.21 [ $\mu\text{m}$ ]. Calcolando in seguito la risposta in frequenza del dispositivo alla distanza di 1 [cm] attuato con 1 [V] DC e 0.2 [V] AC, ne è derivato che la frequenza di risonanza, a cui viene ottenuto il picco di emissione sonora del valore di 99 [dB], si sposta a 10.2 [kHz]. Questo spostamento della frequenza è dovuto alla rigidità aggiuntiva fornita dalla nuova stratigrafia implementata.

In seguito, è stato riprodotto il modello del dispositivo proposto dai ricercatori della National Tsing Hua University di Taiwan in [18] e presentato, in questo elaborato, al capitolo 3.2.4.3. Questo dispositivo è stato studiato con l'implementazione di due diverse stratigrafie.

Per quanto riguarda la prima stratigrafia utilizzata, quella originale presentata nell'articolo [18], sono state calcolate le curve di risposta in frequenza, per una tensione imposta di 1 [V] DC e 1 [V] AC, sia per il caso di attuazione esclusivamente degli elettrodi sulle molle, sia per il caso di attuazione di molle ed elettrodo centrale. Stimolando l'elettrodo centrale sono stati ottenuti due picchi nella risposta in frequenza, e il valore massimo raggiunto è di 92 [dB] a 9.2 [kHz] ed 1 [cm] di distanza. Senza la stimolazione dell'elettrodo centrale, invece, con la stessa tensione applicata ed effettuando la misurazione alla stessa distanza, deriva una risposta in frequenza che presenta tre picchi, di cui uno alle basse frequenze. Il valore massimo di SPL raggiunto è di 68 [dB] a 16,8 [kHz]. Confrontando le curve di emissione acustica risulta che le prestazioni del dispositivo attuato con la stimolazione dell'elettrodo centrale sono migliori.

Passando all'analisi del medesimo dispositivo in cui è stata implementata la stratigrafia proposta da STMicroelectronics, è stata calcolata la configurazione di riferimento del dispositivo che presenta allo stato iniziale una deflessione che raggiunge il suo massimo a 1.9 [ $\mu\text{m}$ ]. Attuando il dispositivo solamente con gli elettrodi posti sulle molle risulta una risposta in frequenza con un solo picco, posto a 10.75 [kHz] in cui il sistema ha un modo di vibrazione a pistone. Gli altri modi di vibrazione risultano a frequenza superiori, al di fuori della banda dell'udibile. Questo fatto risulta essere in linea con il cambiamento della stratigrafia e quindi l'irrigidimento della struttura. Al picco di risonanza il livello di pressione acustica generato alla distanza di 1 [cm] riporta un valore di 106 [dB], alla distanza di 10 [cm] questo valore si abbassa fino ad 86 [dB].

Infine, vengono presentati tre modelli di dispositivi ideati prendendo spunto dai microspeakers analizzati in precedenza e ispirandosi al mondo dei kirigami. In tutti e tre i sistemi è stata implementata la stratigrafia proposta da STMicroelectronics.

Considerando il primo modello, presentato nel capitolo 5.5 e chiamato "Quadrifoglio", è stata calcolata la configurazione di riferimento, data dagli sforzi residui, che presenta una deflessione massima di 6,3 [ $\mu\text{m}$ ]. Sono stati analizzati i modi di vibrazione in modo da progettare una struttura con più risonanze all'interno della banda dell'udibile che tengano a valori alti il livello di SPL generato. Vengono trovati due modi di vibrazione utili alla generazione di segnale acustico: un modo a pistone alle basse frequenze, 1.55 [kHz]; un modo a tamburo alle alte frequenze, 10.6 [kHz]. Per quanto riguarda la curva di risposta in frequenza, essa è stata calcolata con un'attuazione di 1 [V] DC e 1 [V] AC alla distanza di 10 [cm] in due condizioni diverse, ossia imponendo la chiusura della cavità retrostante al dispositivo o permettendo la libera propagazione dell'onda generata nella cavità stessa. Sono state ottenute quindi due curve, ognuna delle quali presenta due picchi relativi alle risonanze del sistema. I livelli massimi raggiunti di pressione acustica generata sono in corrispondenza del modo a tamburo e assumono valori di 88 [dB] e 80 [dB] rispettivamente per la condizione di cavità aperta

e chiusa. Dalle precedenti analisi è seguito un confronto con il modello proposto dall'Istituto Fraunhofer nelle medesime condizioni di attuazione, stratigrafia, condizioni al contorno e valutazione dei risultati. Dal confronto risulta che il dispositivo "Quadrifoglio" con cavità aperta presenta dei picchi di emissione acustica che riescono a migliorare localmente le prestazioni del dispositivo dell'Istituto Fraunhofer solo a determinate frequenze, generalmente la curva della risposta in frequenza rimane al di sotto della curva di riferimento di circa 20 [dB]; per quanto riguarda il medesimo dispositivo con cavità chiusa, le prestazioni del sistema ideato dai ricercatori tedeschi risultano essere migliori su tutta la banda dell'udibile.

A partire dalle analisi fatte sul primo dispositivo proposto è stata ideata una nuova struttura in modo tale da avvicinare i valori delle frequenze di risonanza per poter mantenere la curva dell'emissione acustica il più alta possibile tra i picchi di risonanza. Per fare ciò è stata modificata la geometria inserendo degli intagli, a metà dei petali del "Quadrifoglio", che garantiscano una maggior flessibilità del dispositivo in modo da abbassare il valore della frequenza di risonanza del modo a tamburo. Dalle analisi svolte non solo è stato osservato che questo avvicinamento delle frequenze di risonanza è avvenuto con successo, il dispositivo presenta, infatti, un modo a pistone posto a 1.54 [kHz] e un modo a tamburo a 7.11 [kHz]; viene anche rilevata la presenza di un terzo modo di vibrazione utile all'emissione acustica nella banda dell'udibile, a 17.4 [kHz]. Dal calcolo della risposta in frequenza, nelle stesse condizioni del dispositivo "Quadrifoglio" precedentemente illustrato, derivano infatti tre picchi nel valore di pressione acustica generata il cui massimo viene raggiunto in corrispondenza del modo a tamburo assumendo valori rispettivamente di 78 [dB] e 62 [dB] a seconda che la cavità sia considerata aperta o chiusa. Nel confronto con il dispositivo ideato dai ricercatori dell'Istituto Fraunhofer viene osservato che le prestazioni della nuova struttura proposta in questo lavoro di tesi sono inferiori a quelle del microspeaker preso di riferimento. È riuscito comunque l'avvicinamento dei primi due modi di vibrazione ed è stato introdotto un terzo modo di vibrazione che permette di mantenere alta la curva di emissione acustica del dispositivo anche oltre il picco di risonanza del tweeter. Con questi calcoli è stato confermato il fatto che mantenendo aperta la cavità acustica retrostante al dispositivo vengono raggiunti livelli più alti di pressione sonora emessa.

Infine, è stata modificata ulteriormente la struttura introducendo delle molle piegate in modo tale da avere una struttura più affidabile del singolo cantilever e che garantisca comunque un'ottima flessibilità al dispositivo. Calcolando la deflessione massima della configurazione di riferimento della struttura viene osservato un valore di 5.08 [ $\mu\text{m}$ ]. I modi di risonanza, con conformazione a pistone e a tamburo, sono situati rispettivamente a 1.94 [kHz] e 7.2 [kHz]. Calcolando la risposta in frequenza del dispositivo a 10 [cm] di distanza e con un'attuazione di 1 [V] DC e 1 [V] AC deriva che il livello di pressione acustica generata dal dispositivo è moderato, non vengono raggiunti i 70 [dB] in alcun punto della banda dell'udibile. Risultato interessante, però, è la forma della curva che risulta essere piatta in larghi tratti del range dell'udibile.

I margini di miglioramento dei dispositivi proposti sono sicuramente ampi, dal momento che, in tutte le configurazioni proposte, si è utilizzato uno strato unico di PZT, per cui un primo passo in avanti che può essere fatto è quello di modellare diversi domini di piezoelettrico, in modo tale da avere un'attuazione differenziata nelle diverse zone del dispositivo, massimizzando la risposta in frequenza di quest'ultimo. Un'ulteriore modifica che si potrà fare in futuro è sicuramente l'ampliamento della struttura, in modo tale che, avendo una superficie maggiore, si abbia un maggior volume di aria spostata e, conseguentemente a ciò, una migliore emissione acustica su tutta la banda dell'udibile. Infine, si potrà anche incrementare la tensione di attuazione per ottenere valori di emissione acustica più alti, in modo da avvicinarsi sempre di più all'obiettivo, ossia l'emissione ad un livello di circa 120 [dB] in modo costante su tutta la banda dell'udibile.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Corigliano, R. Ardito, C. Comi, A. Frangi, A. Ghisi e S. Mariani, «Mechanics of Microsystems», New York: Wiley, 2018.
- [2] J. W. Judy, «Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications», *Smart Materials and Structures*, vol. 10, pp. 1115-1134, 2001.
- [3] PRIME Faraday Partnership, «An Introduction to MEMS», Loughborough, Prime Faraday Partnership, pp. 1-3, 2002.
- [4] K. E. Petersen, «Silicon as a Mechanical Material», *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, n. 5, pp. 420-457, 1982.
- [5] A. Corigliano, B. D. Masi, A. Frangi, C. Comi, A. Villa e M. Marchi, «Mechanical Characterization of Polysilicon Through On-Chip Tensile Tests», *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, n. 2, pp. 200-219, 2004.
- [6] G. D. Shilpa, K. Sreelakshmi e M. Ananthaprasad, «PZT thin film deposition techniques, properties and its application in ultrasonic MEMS sensors: a review», in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol.149, pp. 1632-1639, 2016.
- [7] B. Lazarova, «Experimental characterization of piezoelectric micromachined ultrasound transducer - PMUT», pp. 14-16, 2019.
- [8] F. Stoppel, Eisermann, Gu-Stoppel, Kaden, Giese e Wagner, «Novel membrane-less two-way MEMS loudspeaker based on piezoelectric dual-concentric actuators», in *19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, Kaohsiung, Taiwan, T3P.098 pp. 2047-2050, 2017.
- [9] H.-H. Cheng, Z.-R. Huang, S.-C. Lo, Y.-J. Wang, M. Wu e W. Fang, «Piezoelectric MEMS microspeaker with suspension springs and dual electrode to enhance sound pressure level», in *IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Seoul, South Korea, W-138 pp. 767-770, 2019.
- [10] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens e J. Sanders, «Fundamentals of Acoustics - fourth edition», New York: John Wiley & Sons Inc., pp. 113-142 e pp. 210-238, 2000.

- [11] USound, «MEMS-Speakers THD Assessment,» [Online]. Available: <https://athena.usound.com/what-is-thd/>.
- [12] SONION, «Data Sheet Receiver 26A005/8», [Online]. Available: "<https://www.sonion.com/audio/full-range-single-drivers/>". 2009.
- [13] USound, «MEMS Speaker Technology Introduction», [Online]. Available: "<https://athena.usound.com/download/mems-speakers-whitepaper/>". 2018.
- [14] USound, «Datasheet Achelous UT-P 2018», [Online]. Available: "<https://www.usound.com/technical-documentation/>". 2018.
- [15] F. Stoppel, A. Mannchen, F. Niekief, D. Beer, T. Giese e B. Wagner, «New integrated full-range MEMS speaker for in-ear applications», in *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Belfast, UK, pp. 1068-1071, 2018.
- [16] H.-H. Cheng, Z.-R. Huang, S.-C. Lo, Y.-J. Wang, M. Wu e W. Fang, «Piezoelectric MEMS microspeaker with suspension springs and dual electrode to enhance sound pressure level,» in *IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Seoul, South Korea, W-138 pp. 767-770, 2019.
- [17] H.-H. Cheng, Z.-R. Huang, M. Wu e W. Fang, «Low frequency sound pressure level improvement of piezoelectric MEMS microspeaker using novel spiral spring with dual electrode», in *20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII*, Berlin, Germany, pp. 2013-2016, 2019.
- [18] H.-H. Cheng, S.-C. Lo, Y.-J. Wang, Y.-C. Chen, W.-C. Lai, M.-L. Hsieh, M. Wu e W. Fang, «Piezoelectric microspeaker using novel driving approach and electrode design for frequency range improvement», in *IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Vancouver, Canada, pp. 513-516, 2020.
- [19] S.-H. Tseng, S.-C. Lo, Y.-J. Wang, S.-W. Lin, M. Wu e W. Fang, «Sound pressure and low frequency enhancement using novel PZT MEMS microspeaker design,» in *2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Vancouver, Canada, pp. 546-549, 2020.
- [20] «xMEMS», [Online]. Available: "<https://xmems.com/products/>".
- [21] J. Li e Z. Liu, «Focused-ion-beam-based nano-kirigami: from art to photonics», *Nanophotonics*, vol. 7, n. 10, pp. 1637-1650, 2018.

- [22] M. Hashimoto e Y. Taguchi, «Design and Fabrication of a Kirigami-Inspired Electrothermal MEMS Scanner with Large Displacement», *Micromachines*, vol. 11, n. 4, 362, pp. 1-12, 2020.
- [23] T. Zielinski, «Fundamentals of Piezoelectricity», Lecture notes of Introductory Course on Multiphysics Modelling. Available: "<http://bluebox.ippt.pan.pl/~tzielins/index.php?im=1&id=lectures.html>".
- [24] A. Frangi, A. Corigliano, M. Binci e P. Faure, «Finite element modelling of a rotating piezoelectric ultrasonic motor», *Ultrasonics*, vol. 43, pp. 747-755, 2005.
- [25] G. Massimino, «Modellazione e simulazione di un micro-trasduttore ultrasonico piezoelettrico», Tesi di laurea magistrale, pp. 22-24 e 34-44, 2014.
- [26] G. Massimino, «Modelling and simulation of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers», Ph.D Thesis, pp. 17-21, 2020.
- [27] SONION, «What is Balanced Armature Receiver Technology?», [Online]. Available: "<https://www.sonion.com/audio/balanced-armature-drivers/>", 2016.
- [28] O. Thomas, «Dynamique linéaire et non linéaire de structures élastiques et piézoélectriques», [Online] Available: "<http://www.lsis.org/thomaso/Rapports/Thomas2011-HDR.pdf>" pp. 28-30, 2011.
- [29] A. Jbaily e R. Yeung, «Piezoelectric devices for ocean energy: a brief survey», *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, vol. 1, pp. 101-118, 2014.
- [30] A. Junior, Coelho, Malfatti e Brusamarello, «Proposal of a Micro Generator Piezoelectric for Portable Devices from the Energy Harvesting», in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Cordoba, n.12, 2014.