

Progettazione di Sensori e Microsistemi



Progettazione di un accelerometro capacitivo a membrana mobile con
COMSOL Multiphysics

Progetto n.13

Studente:

Antonio Di Vito

Introduzione

Il progetto consiste nella costruzione 3D e nello studio dei fenomeni fisici di un accelerometro capacitivo monoassiale dotato di una membrana mobile e una fissa, completamente fabbricato in polisilicio. Nello specifico, gli elettrodi del dispositivo sono associabili alla membrana mobile e alla membrana fissa. La membrana mobile del dispositivo è sostenuta da delle molle laterali, dette anche tethers, che mantengono meccanicamente ancorato l'elettrodo superiore al telaio. Quella fissa fa parte del telaio ed è ferma. La polarizzazione delle due membrane permette l'uso del dispositivo come accelerometro basato su funzionamento capacitivo.

Lo studio iniziale prevede inizialmente di analizzare andamenti di deflessione, di stress e di variazione di capacità a seconda di diversi valori (10) di accelerazione applicati verticalmente all'oggetto; dopodiché si passa allo studio del dispositivo per un valore di accelerazione scelto e quindi variando lo spessore delle molle (5 valori), lasciando inalterato quello della membrana mobile.

Il secondo e ultimo studio riguarda lo studio dei primi 6 modi di vibrazione libera del dispositivo.

Prima di discutere i risultati ottenuti, si vuole dare una overview di quello che è il workflow di progetto facendo uso del software simulativo Comsol Multiphysics (versione 5.5).

Moduli di simulazione impiegati

Si è scelto due moduli da accoppiare per la simulazione del primo studio:

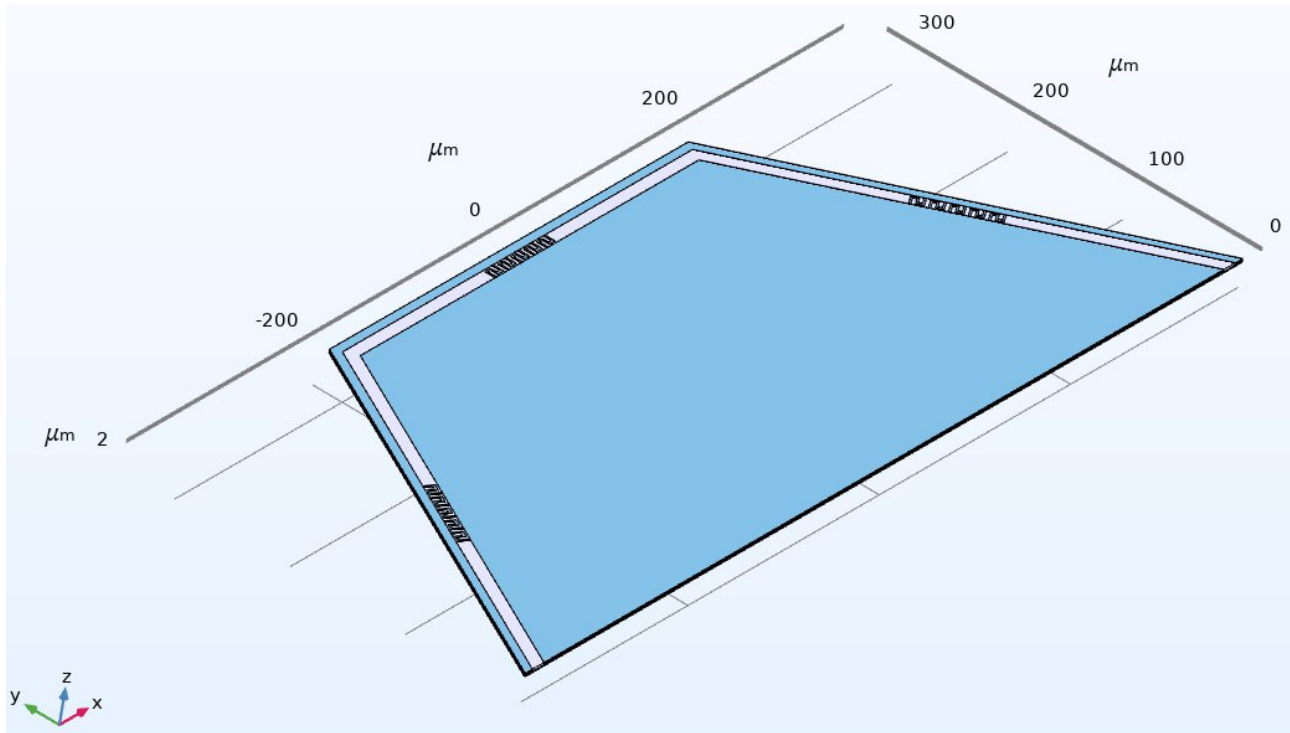
- Modulo elettrostatico: per la trattazione di effetti capacitivi è necessario studiare l'elettrostatica del dispositivo;
- Modulo meccanico: necessario per lo studio della deflessione e dello stress subito dal dispositivo.

In realtà, è presente un terzo modulo riguardante la moving mesh, di cui se ne parlerà nel dettaglio dopo.

Il software genererà quindi automaticamente la sezione Multiphysics che accoppia le fisiche descritte prima.

Per il secondo studio si userà il modulo Eigenfrequencies.

Descrizione della struttura



Ciò che vediamo in questo snapshot è la rappresentazione di una metà del dispositivo. Per motivi di ingrandimento e misure si è preferito lasciare l'immagine prodotta dal software alla fine del workflow delle geometrie, il quale prevede un taglio centrale della struttura. Il fine di questo procedimento è utile per il software simulativo ad alleggerire i calcoli della simulazione. Nelle immagini successive, sarà meglio visibile nella sua completezza. Premesso ciò, la forma del dispositivo è stata suggerita del paper proposto come base di lavoro che riguarda un altoparlante micromachined¹.

L'accelerometro monoassiale in polisicio è formato da un anello esterno esaedrico che funge da telaio per gli elettrodi, da molle di aggancio (6 gruppi da 5 molle) e dagli elettrodi superiore ed inferiore. Il primo in questione è quello tenuto sollevato dalle molle. La distanza tra gli elettrodi è di 1 μm. Il dielettrico della struttura è aria.

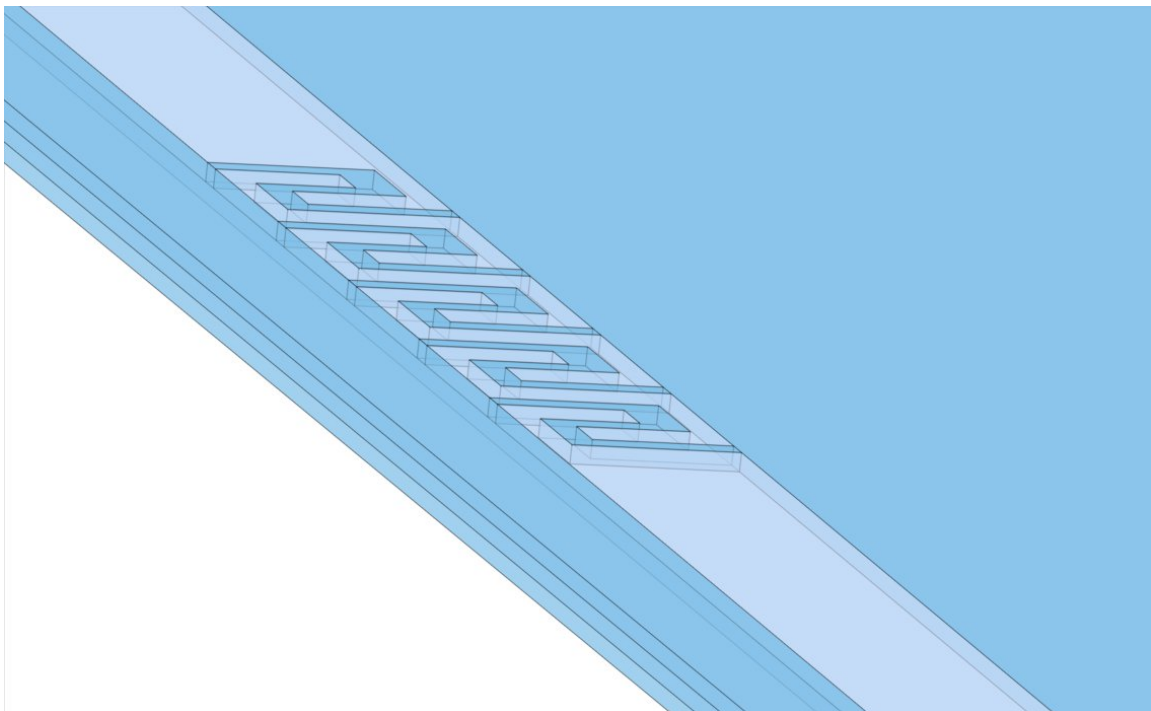
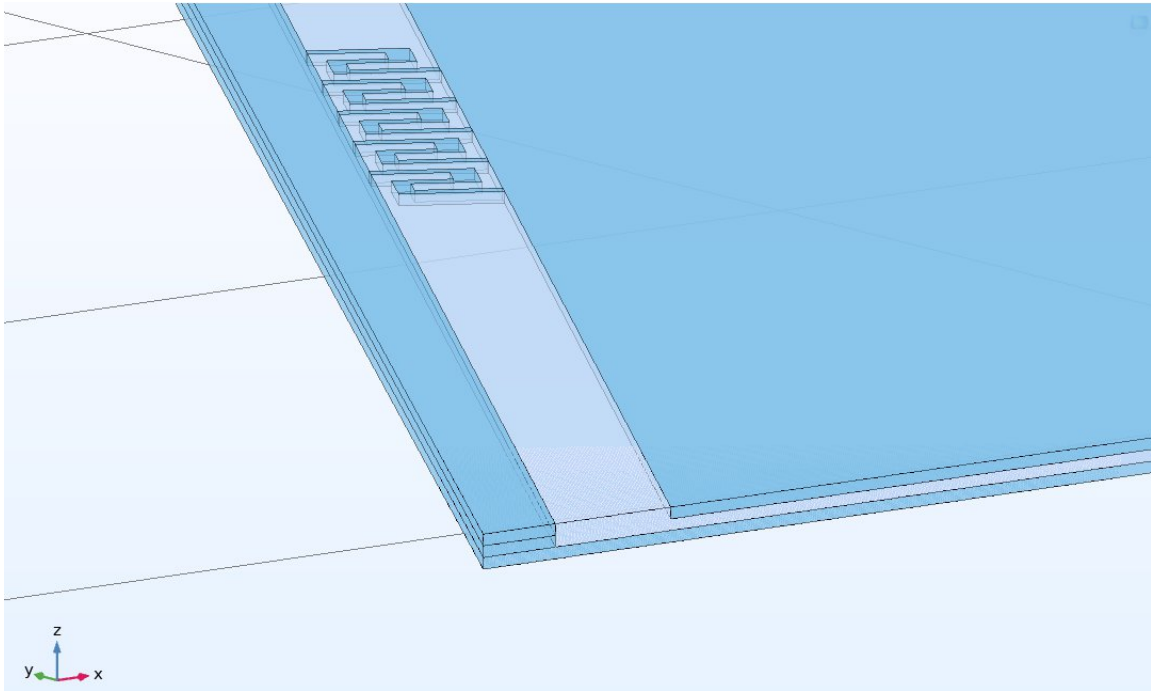
L'anello del telaio ha un diametro di 750 μm ed è largo 7.5 μm, le molle hanno un lato di 10 μm (sono inscritte in un quadrato) e l'elettrodo centrale ha un diametro di 732.5 μm e uno spessore di 1 μm.

La geometria è stata disegnata attraverso l'uso di più workplanes ad offset verticali diversi: in tal modo si riesce ad ottenere una discreta flessibilità nel disegno. I workplanes sono stati fatti per:

- Anello esterno superiore e molle;
- Aria;
- Gap tra gli elettrodi;
- Elettrodo inferiore;
- Elettrodo superiore (membrana mobile).

Ogni workplane viene estruso con una determinata dimensione. Dopo aver fatto questo vengono eseguite delle operazioni booleane sulla struttura estrusa riguardante il partizionamento a metà dell'oggetto (usando un workplane che lo tagli). Infine, viene usato uno scaling factor utile in fase di studio per vedere come cambiano i risultati ingrandendo o rimpicciolendo il dispositivo anisotropicamente lungo il piano xy (z è l'ascissa che dà tridimensionalità all'oggetto).

Nelle figure in basso si mette in rilievo la sezione del dispositivo che mostra gli anelli, l'elettrodo superiore e inferiore, le molle e l'aria.



Materiali usati

Come già citato, la struttura è completamente in polisilicio e il dielettrico è l'aria. I parametri fisici sono stati configurati con i settings di default.

Condizioni al contorno

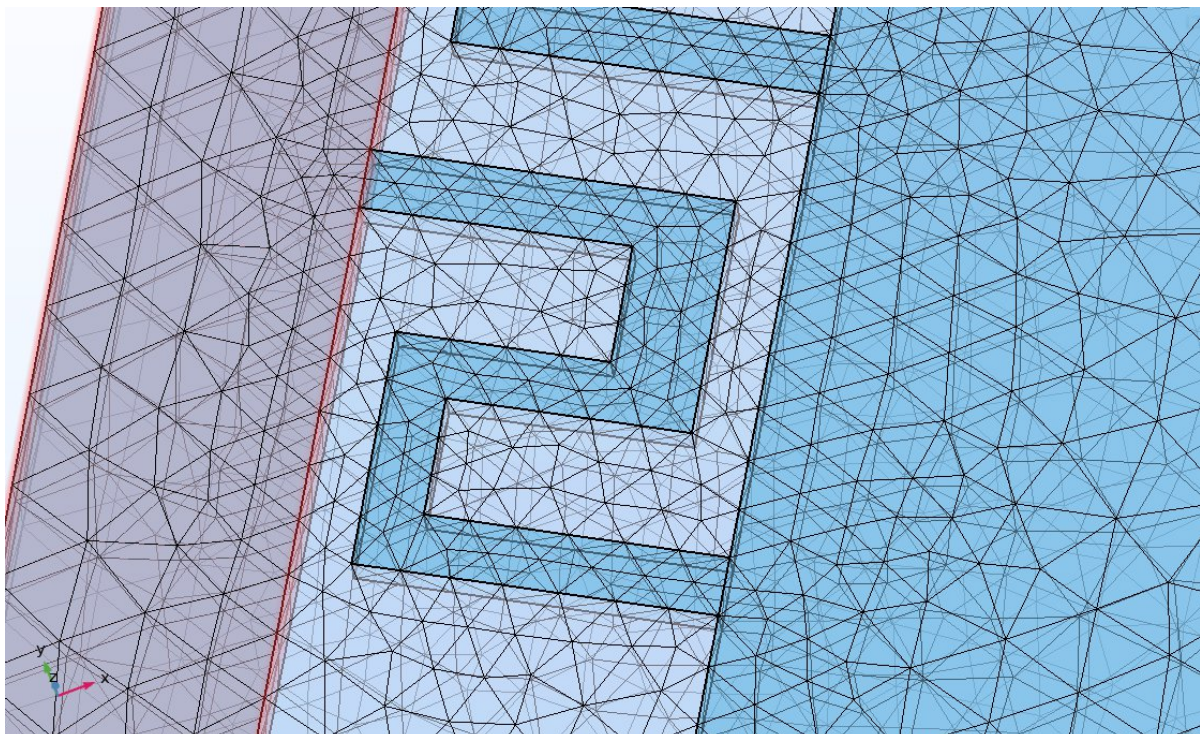
Per il modulo di meccanica solida si è usato un constraint fissato per le superfici dell'anello e per la base. Viene quindi applicato un body load all'elettrodo superiore (accelerazione, volume) con una forza verticale lungo l'asse z di con una accelerazione verso il basso parametrica. Viene quindi imposto un vincolo di simmetria per le superfici della sezione solida per i motivi di partizionamento del dispositivo.

Per il modulo di elettrostatica vengono usati come terminale di ground la base del dispositivo e come terminale di sensing la membrana superiore, alla quale è applicata una tensione di 1 V. Infine, è stato inserito un constraint riguardante la conservazione di carica nell'aria che, essendo non solida, non è considerata tale di default dal software.

Per quanto riguarda il dominio dell'aria, si è fatto uso del modulo moving mesh per meglio caratterizzare la fisica all'interno di questo fluido, quindi impostando il deforming domain e la simmetria sulla sezione di aria tagliata dal partizionamento del dispositivo.

Mesh usata

Si è usato una mesh automaticamente generata ma ottimizzata per l'uso di semiconduttori (impostabile dal menu a tendina) con una generazione di tetraedri di dimensione predefinita "fine". La generazione di mesh non dà alcun warning ed è ritenuta sufficientemente accurata per gli studi effettuati.



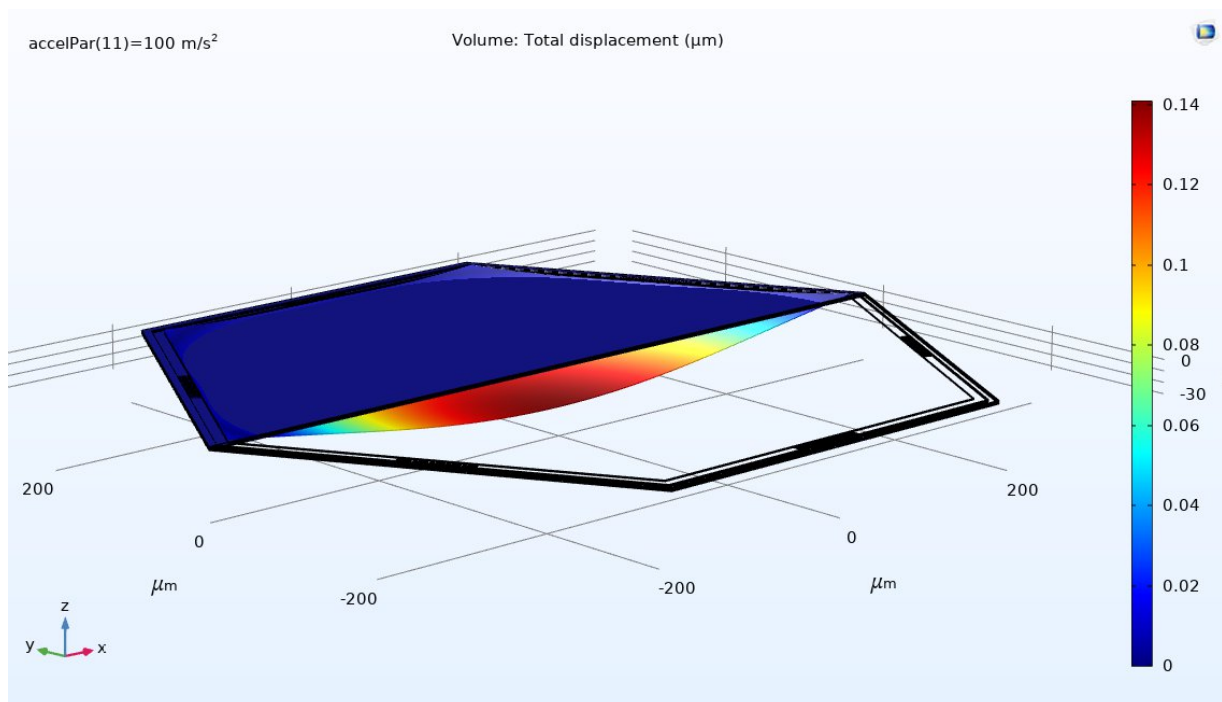
Premessa per gli studi effettuati

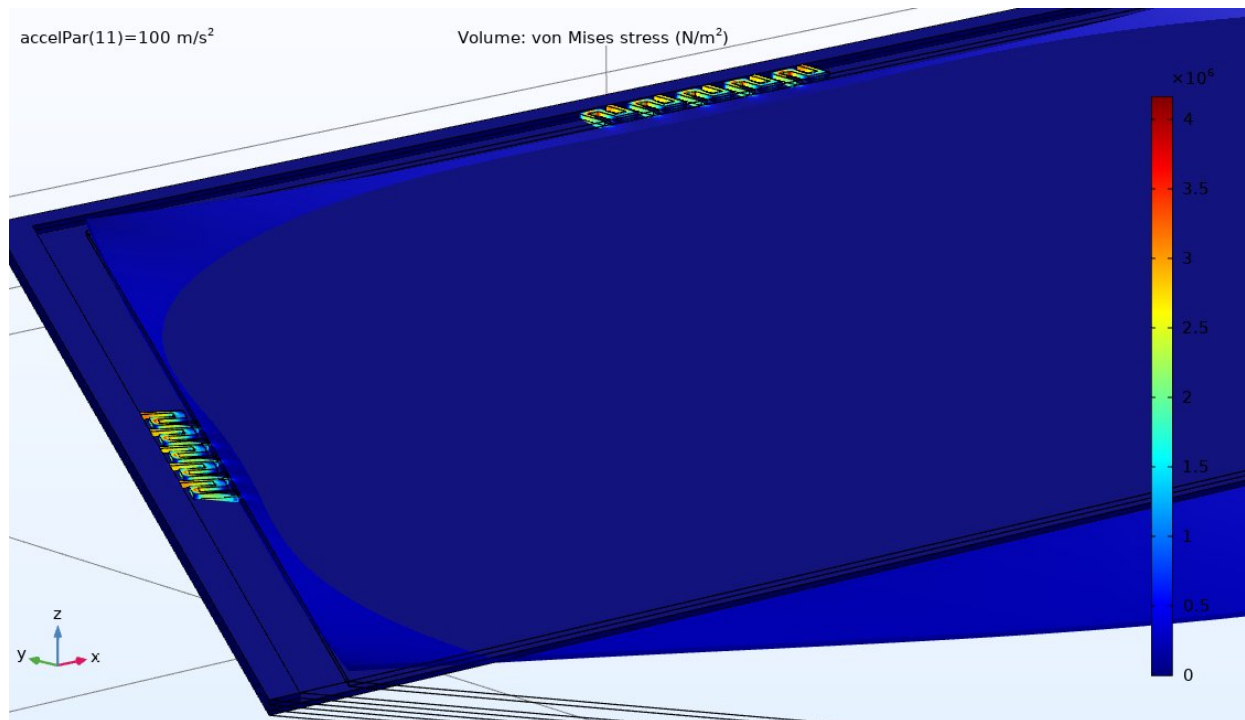
E' utile specificare che per il plot dei dati è stato usato un dataset mirrored in quanto è stata studiata una struttura sezionata. Per la misura della capacità del dispositivo, quindi, è stata effettuata una moltiplicazione per due.

Studio 1.A

In questo studio si va ad analizzare l'andamento della deflessione, dello stress e della capacità del dispositivo in funzione di 10 valori di accelerazione verticale (impostata nelle boundary conditions). Come valori di accelerazione, si è scelto un range da 0 a 100 m/s^2 con un passo di 10. La scelta di questi valori non è ricaduta su un particolare tipo di applicazione, ma sono valori tipici di applicazioni semplici come può essere l'accelerometro di uno smartphone.

In basso si mostrano degli snapshot 3D utili per dare una veloce overview dei calcoli svolti col simulatore per deflessione e stress:





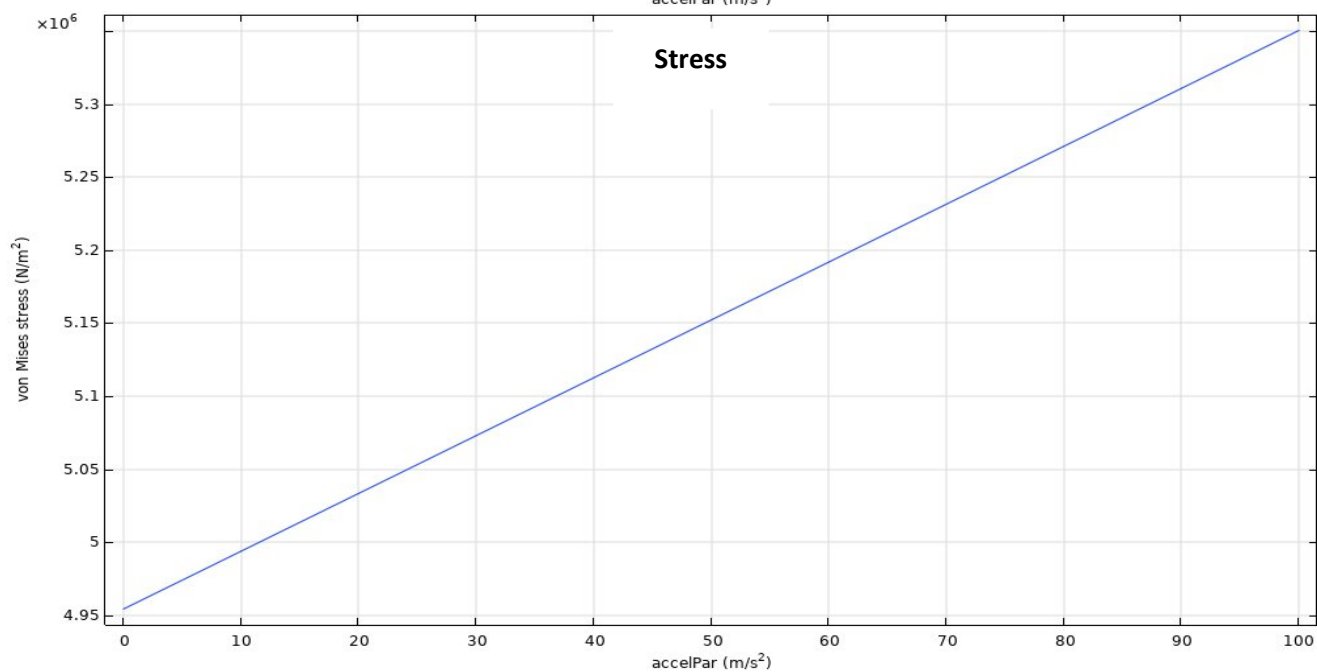
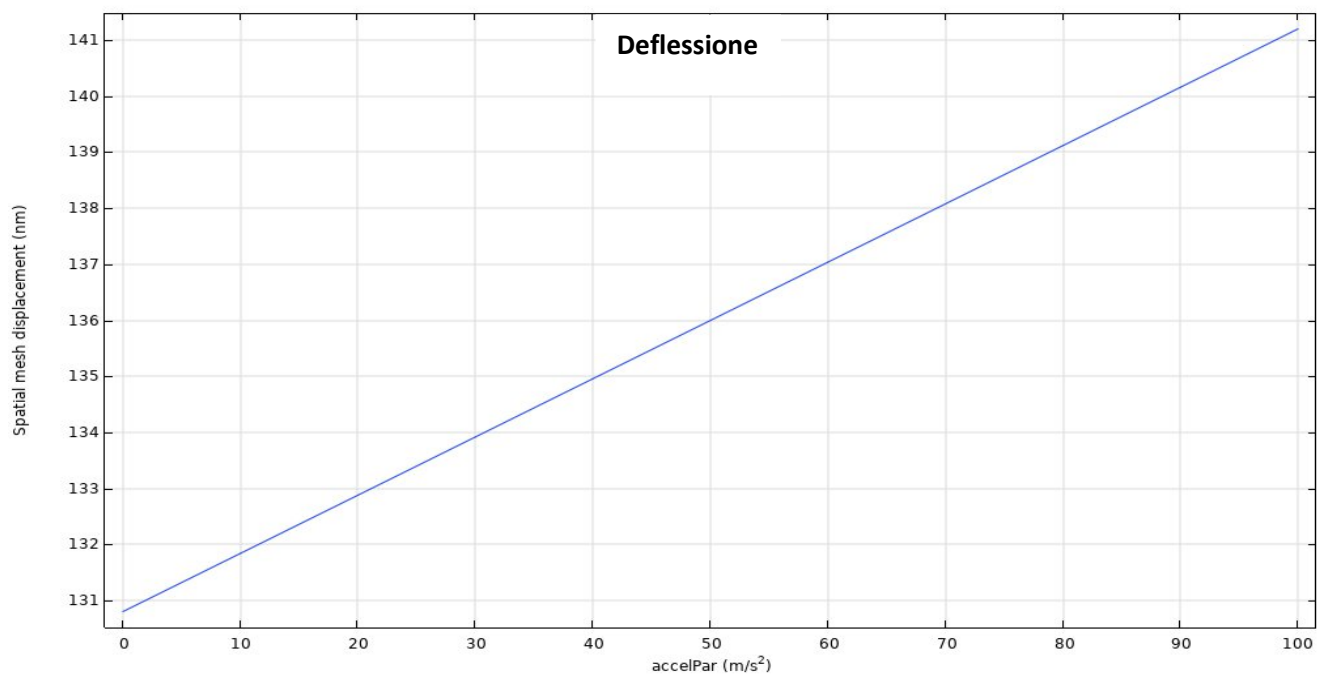
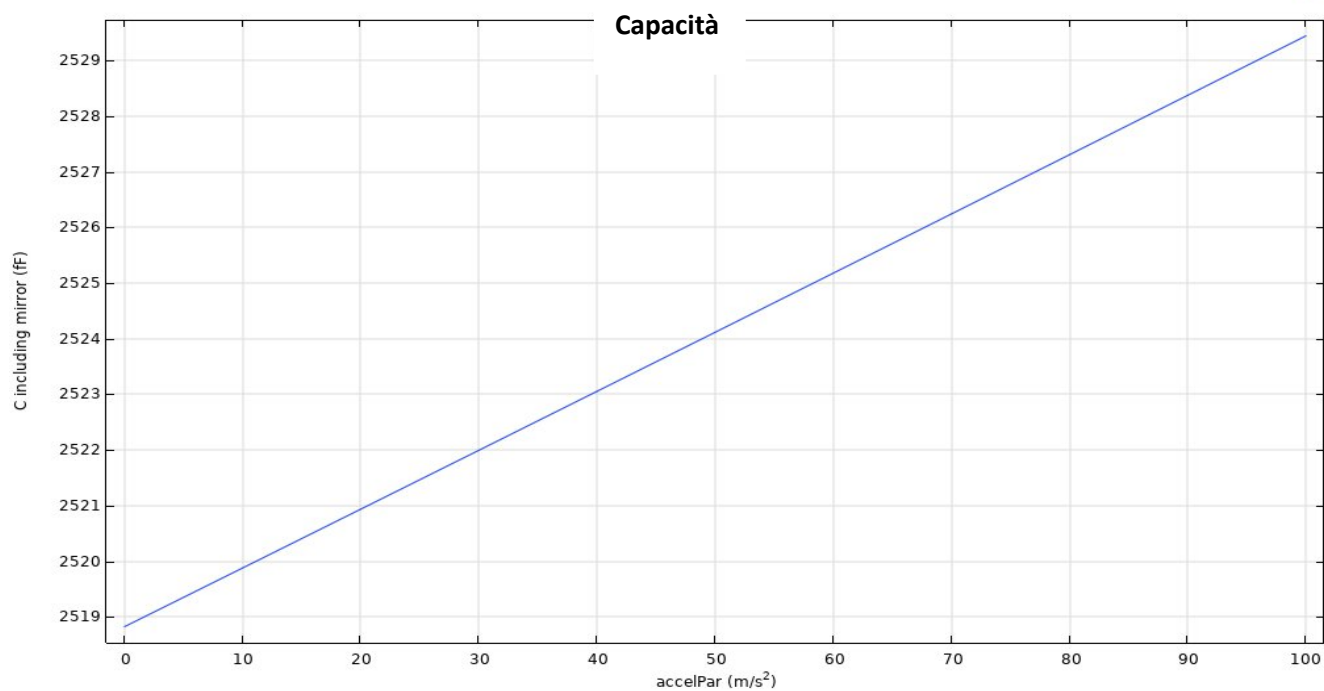
Si nota quindi che:

- l'andamento della deflessione è maggiore nel punto di massima estensione della membrana e i vincoli imposti sull'anello ne bloccano la deflessione.
- le parti del dispositivo maggiormente stressate sono le molle di sospensione che sostengono la membrana superiore senza farla collassare su quella inferiore (pull in). In particolare, lo stress è maggiore all'incastro della membrana.

Teoricamente, come anche suggerito dal paper fornito come base di studio¹, il fenomeno del pull in si verificherebbe a circa 1/3 della distanza, quindi a 0.33 μm . Si può quindi dedurre che il dispositivo funzioni bene fino a circa 200 m/s^2 , laddove la funzione capacità comincerebbe ad assumere tratti non lineari.

Per quanto riguarda lo stress, è maggiore all'incastro a causa del momento flettente che ha il massimo nel punto di incastro.

Questi risultati visivi erano facilmente intuibili ed aspettati. Ora si passa alla quantificazione dei risultati. I valori di capacità, deflessione e stress vengono mostrati graficati:



Analizzando i dati, si vede che per lo sweep parametrico di accelerazione effettuato sugli 11 valori:

- la capacità aumenta linearmente di circa 1 fF alla volta ogni 10 m/s² (le facce si avvicinano a causa di una accelerazione rivolta verso il basso);
- il displacement aumenta linearmente di circa 1 nm ogni 10 m/s² (la deformazione è maggiore con forze maggiori);
- lo stress aumenta linearmente di circa 0.05 N/m² ogni 10 m/s² (lo stress sulle molle è maggiore con forze maggiori).

Per quanto riguarda la capacità, il valore è facilmente stimabile a mano con una buona approssimazione usando la formula:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

dove i simboli stanno per: capacità, costante dielettrica aria, area e distanza elettrodi. Inoltre:

- trascurando gli effetti di bordo (la superficie è molto più grande dello spessore);
- trattando le due facce come di dimensioni uguali;

avrò:

$$C = 1.0006 * 8.854 * 10^{-12} * \frac{335^2 * 10^{-12} * 2.61}{1 * 10^{-6}} \frac{C^2}{N * m^2} \frac{m^2}{m} = 2585 * 10^{-15} \text{ F}$$

che è un numero molto paragonabile a quello restituito dal simulatore.

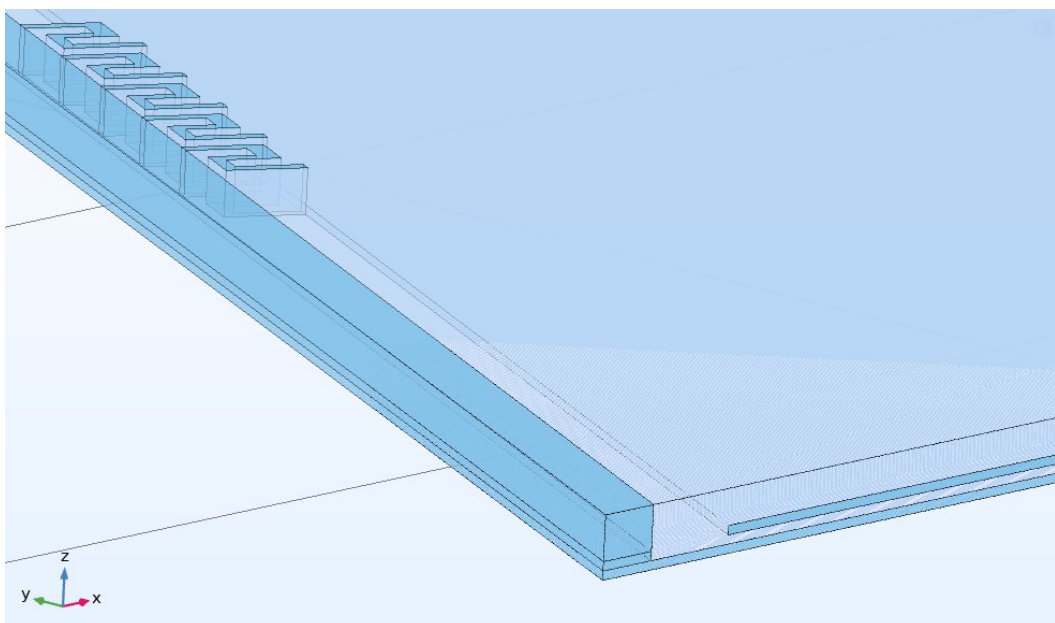
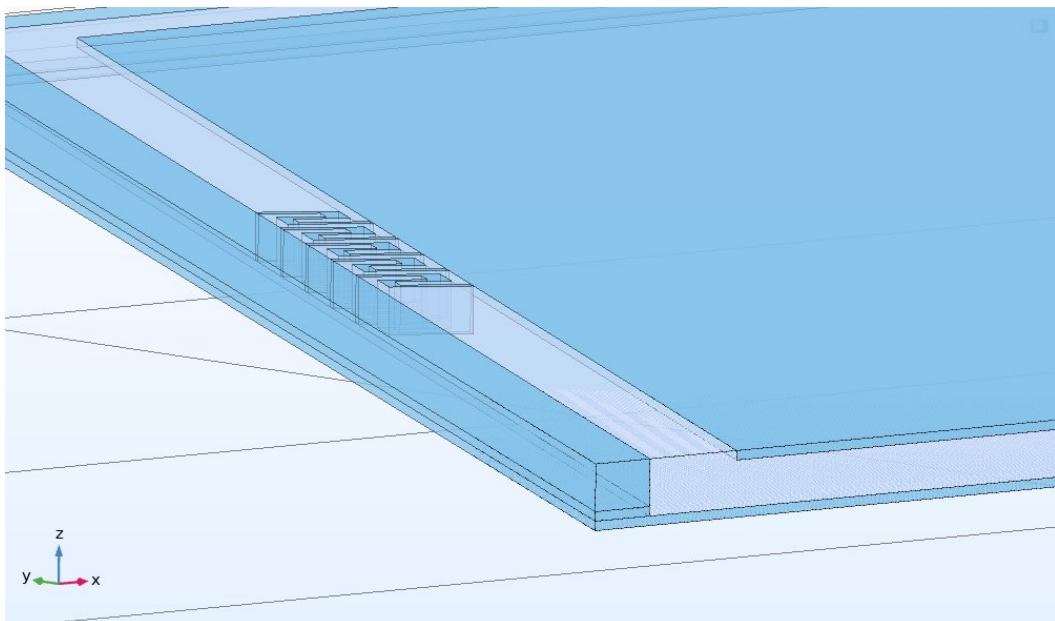
Per gli altri dati, la misurazione a mano è più complicata ed è affidata al simulatore.

Studio 1.B

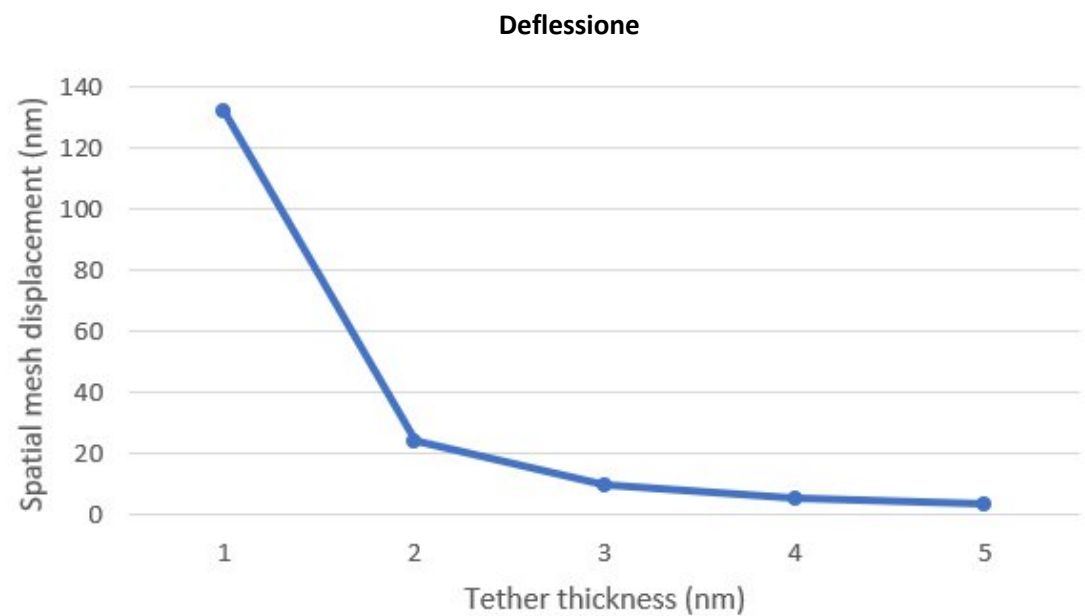
In questo studio si vanno ad analizzare l'andamento della deflessione e della capacità usando molle con spessori più grandi, lasciando inalterato lo spessore della membrana centrale dato un valore di accelerazione. Viene quindi eseguito uno sweep parametrico di spessore. E' necessario comunque notare che la traccia di progetto non specifica se la membrana debba essere attaccata alla parte più alta della molla o alla più bassa: nel primo caso (1) la struttura effettivamente cambia rispetto alla precedente, soprattutto in termini di capacità immagazzinata; nel secondo (caso 2) la struttura è molto simile a quella originale, ma è evidente che sia un po' innaturale a vederla esteticamente. In ogni caso, vengono rappresentate entrambe le forme in ordine rispettivo.

Nota: i plot sono presentati con una grafica creata da Microsoft Excel, in quanto Comsol non ha permesso di eseguire uno sweep parametrico su un parametro che modifica ogni volta la struttura e quindi la mesh.

Si è scelto il valore di accelerazione di 10 m/s^2 . Gli esempi in basso sono per uno spessore di molla di $5 \text{ }\mu\text{m}$.



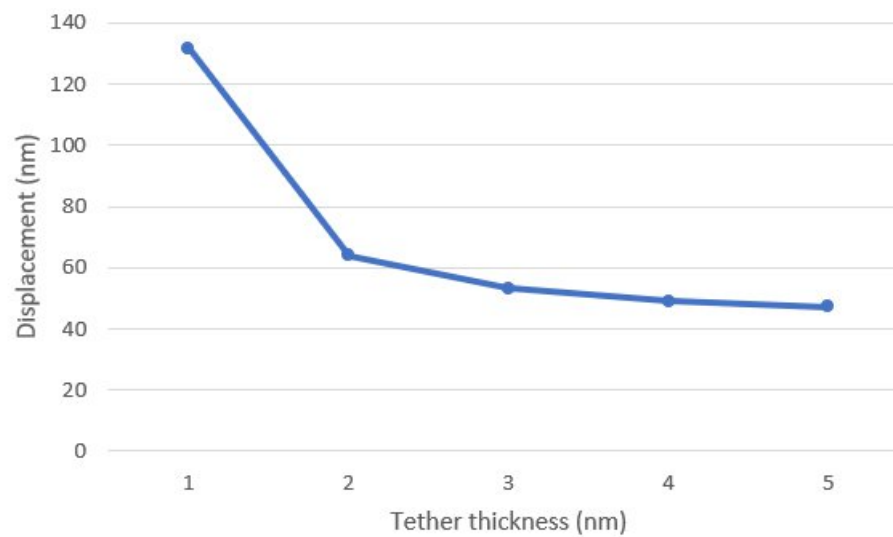
La deflessione avrà questo andamento nel caso 1:



presentando questi valori (da 2 a 5 um):

Spatial mesh displacement (nm)	Spatial mesh displacement (nm)	Spatial mesh displacement (nm)	Spatial mesh displacement (nm)
24.241	9.9176	5.5180	3.6406

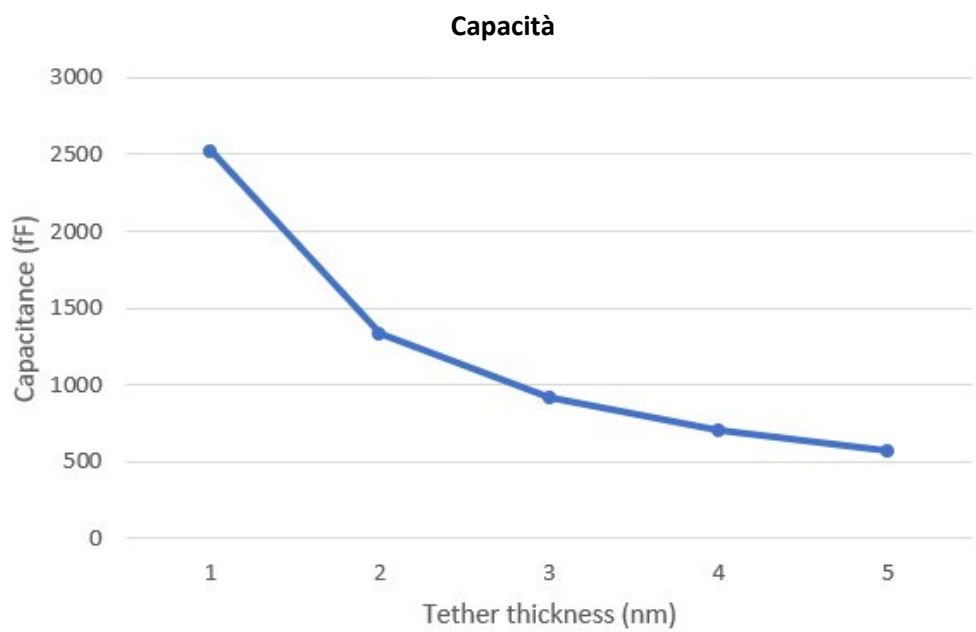
Nel caso 2:



presentando questi valori (da 2 a 5 um):

Spatial mesh displacement (nm)	Spatial mesh displacement (nm)	Spatial mesh displacement (nm)	Spatial mesh displacement (nm)
63.877	53.304	49.028	47.291

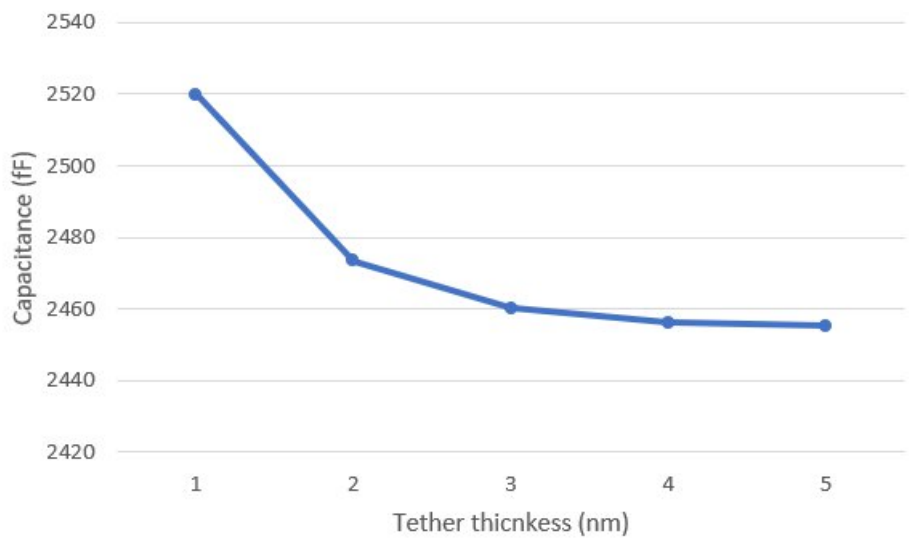
La capacità nel caso 1:



presentando questi valori (da 2 a 5 um):

C including mirror (fF)	C including mirror (fF)	C including mirror (fF)	C including mirror (fF)
1328.7	916.87	701.93	569.48

Nel caso 2:



presentando questi valori (da 2 a 5 um):

C including mirror (fF)	C including mirror (fF)	C including mirror (fF)	C including mirror (fF)
2473.4	2460.3	2456.2	2455.2

Analizzando i dati, si vede che:

- le molle, più spesse, irrigidiscono la struttura e danno un displacement minore della membrana mobile;
- la capacità nel caso 2 (cioè quello paragonabile alla struttura originale) diminuisce a causa dell'irrigidimento che comporta minore deflessione, quindi minore avvicinamento degli elettrodi; nel caso 1, naturalmente, il grosso della differenza è causato dall'allontanamento degli elettrodi.

Il punto più interessante da commentare è il primo (che implicitamente spiega il secondo): si dà una spiegazione qualitativa usando una semplificazione come l'ipotesi di Bernoulli-Navier. In virtù di questa, il momento di inerzia aumenta all'aumentare dell'altezza dell'oggetto che si piega, vale a dire che il materiale è più difficile da piegare se l'altezza della sezione aumenta. Il concetto è facile da carpire con l'equazione:

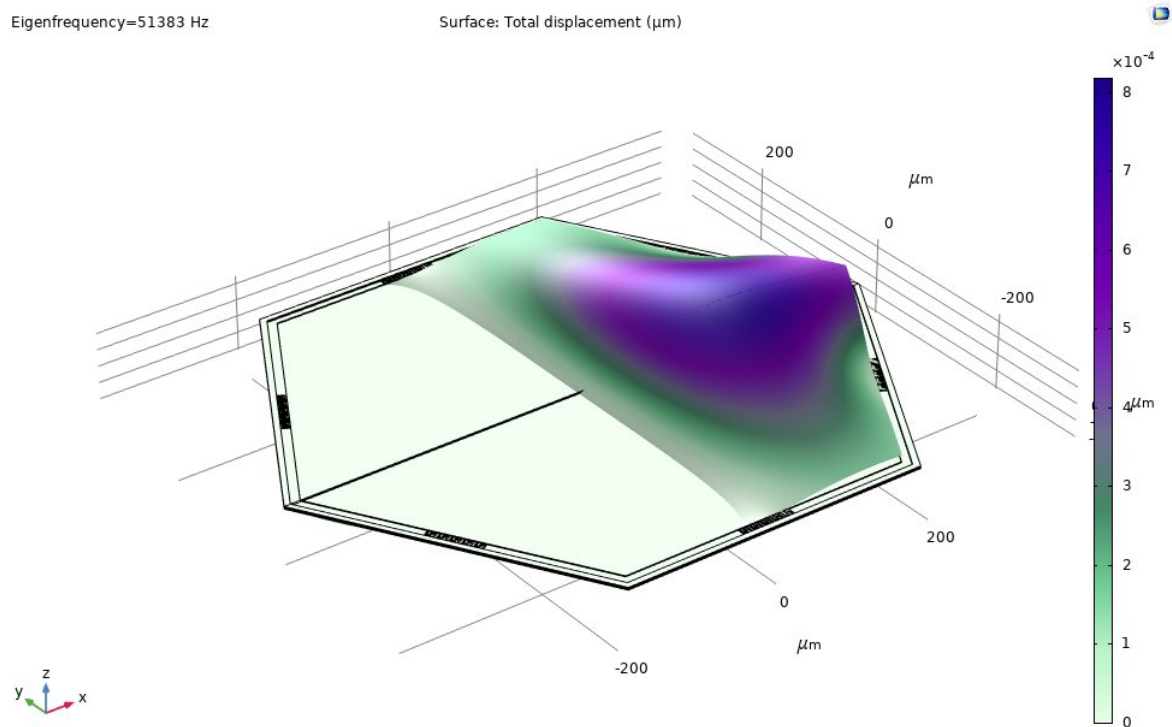
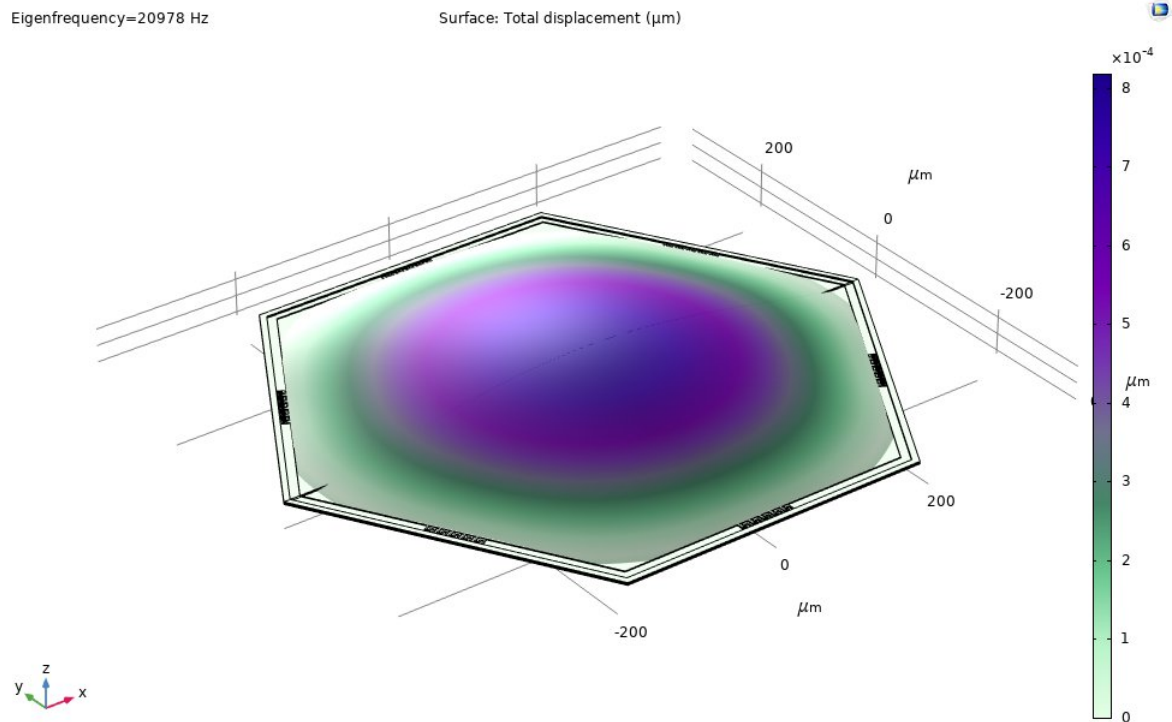
$$J = \frac{b * h^3}{3}$$

dove i simboli stanno per momento di inerzia della sezione rispetto l'asse neutro, base e altezza della sezione.

Aumentando quindi l'altezza, aumenterà il momento di inerzia, che limita il piegamento delle molle esibendo un momento flettente minore. Di conseguenza la membrana sorretta risulterà meno piegata.

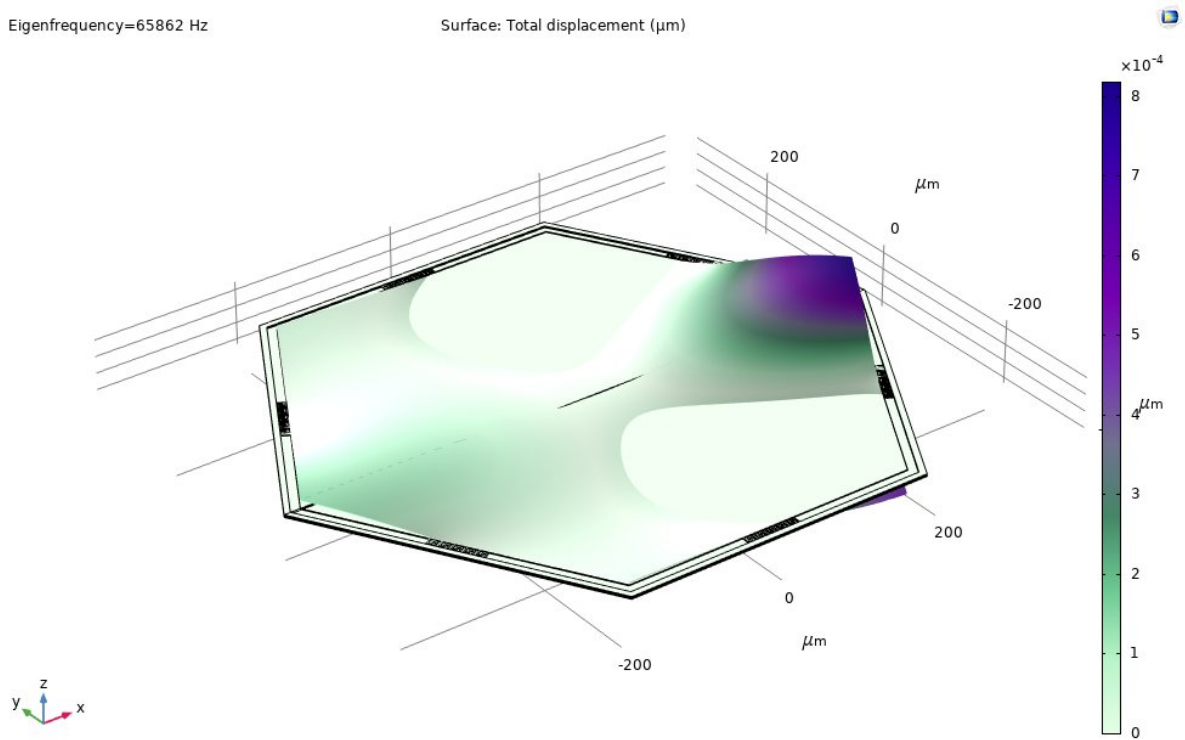
Studio 2

In questa sezione si studieranno i primi 6 modi di vibrazione libera del dispositivo. Essendo una vibrazione libera, il simulatore non sottoporrà il dispositivo ai forzamenti impostati nelle boundary conditions. In basso vengono mostrati gli snapshot del displacement prodotti dal software.



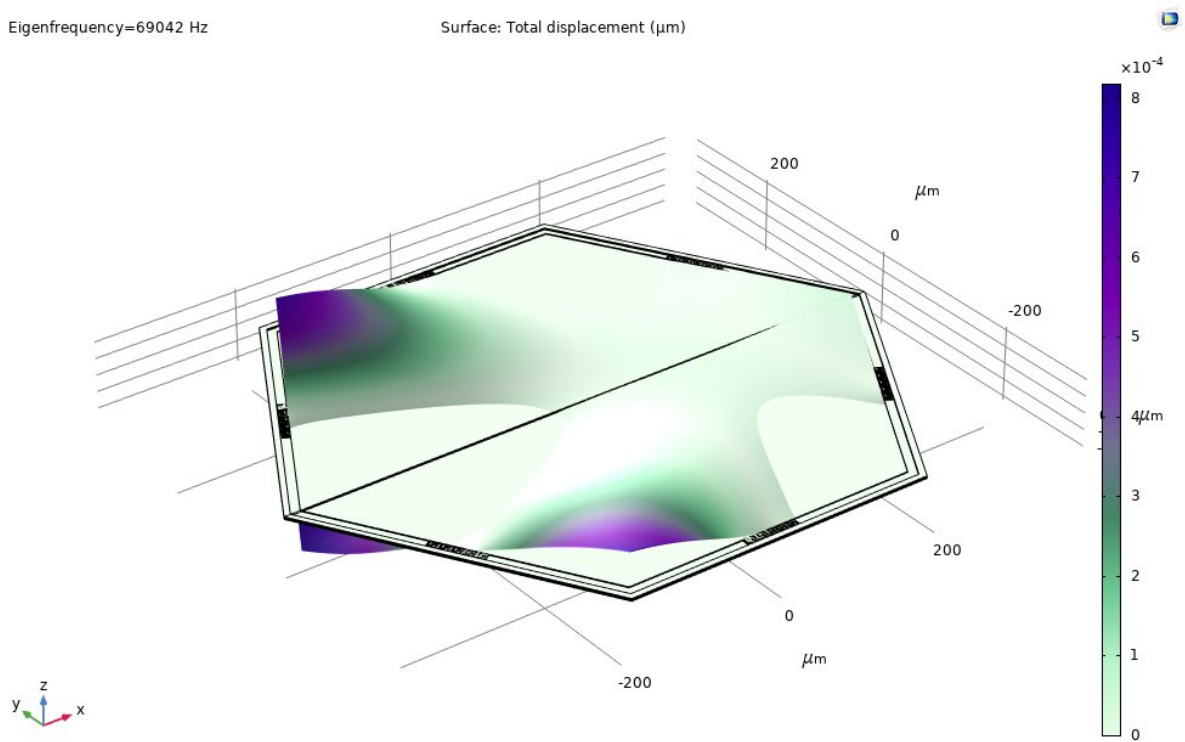
Eigenfrequency=65862 Hz

Surface: Total displacement (μm)



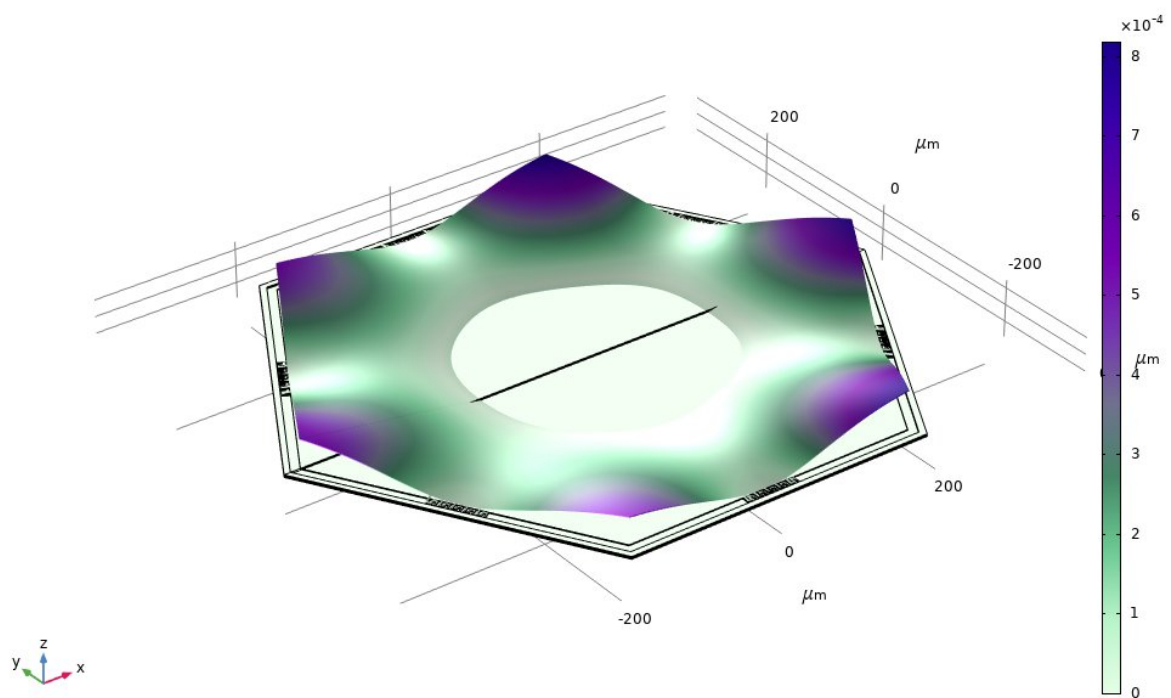
Eigenfrequency=69042 Hz

Surface: Total displacement (μm)



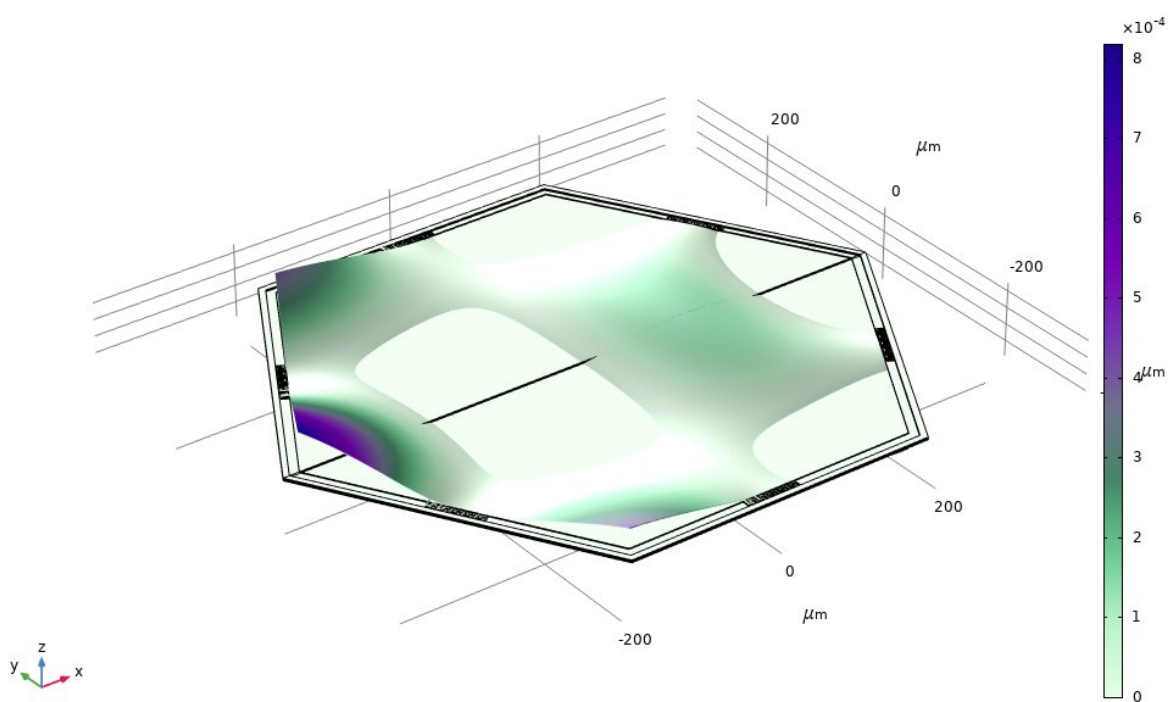
Eigenfrequency=81193 Hz

Surface: Total displacement (μm)



Eigenfrequency=93123 Hz

Surface: Total displacement (μm)



Da questa simulazione si può vedere che il modo di interesse maggiore è il primo, cioè quello a circa 21 KHz, frequenza alla quale l'aria viene spostata uniformemente con un solo nodo di deformazione. Gli altri modi evidenziano evidenti irregolarità di distribuzione. La frequenza di variazione delle forze applicate sull'accelerometro, quindi, deve essere lontana dai picchi di risonanza del sistema.

Studiando i modi di vibrazione per spessori di molle maggiori (di cui se ne discute solo qualitativamente poiché non esplicitamente richiesto dalla traccia di progetto), si nota che il primo modo di vibrazione libera per i 5 valori di spessore parte da 21 KHz fino a convergere a circa 30 KHz. Naturalmente, l'irrigidimento della

struttura di ancoraggio (di cui se ne è parlato nelle sezioni prima) comporta la necessità di frequenze più spinte per far vibrare la struttura della membrana. Volendo dare una spiegazione qualitativa, basti pensare alla membrana riducendone il concetto ad una corda: l'irrigidimento della corda è proporzionale alle forze di tensione lungo questa, conseguentemente la frequenza del suono prodotto pizzicandola aumenta. Per quanto riguarda la membrana, saranno le forze di tensione sul piano della stessa ad essere in modulo maggiore, quindi aumentano anche le frequenze di vibrazione libera. L'equazione qualitativa fornita dalla documentazione² dello stesso simulatore è questa:

$$\omega_n = \frac{k_n}{R} * \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

dove i simboli stanno per: frequenza, coefficiente di risonanza, raggio della membrana (esemplificata a circonferenza), forza di tensione sul piano per unità di spessore e massa per unità di area. E' quindi evidente il legame descritto nelle parole sopra.

Volendo usare l'equazione trattata nel corso³ per le variazioni libere nel materiale (esemplificata):

$$E J \frac{\partial^4 u_z}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = 0$$

dove i simboli stanno per: modulo di Young, momento di inerzia, spostamento verticale e massa per unità di lunghezza. L'interesse ricade sulle vibrazioni che seguono l'equazione $w(x)\sin(\omega t)$ longitudinale (z). Quindi esprimendo l'equazione soprastante con il solo termine variabile $w(x)$:

$$E J \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \rho \omega^2 w = 0$$

altresì scritta come:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \frac{\rho \omega^2}{E J} w = 0$$

quindi riscrivibile in:

$$\gamma^4 - \beta^4 = 0$$

Il fattore β^4 sarà responsabile delle oscillazioni. E' quindi inversamente proporzionale al momento di inerzia, che come mostrato nello studio prima, è proporzionale allo spessore delle molle. A parità di β^4 le vibrazioni libere dovranno avere frequenze maggiori di oscillazione.

Bibliografia

- 1) *MEMS Electrostatic Acoustic Pixel: Arpys Arevalo, David Conchouso, David Castro, and Ian G. Foulds;*
- 2) *Eigenfrequency study:* <https://www.comsol.it/multiphysics/eigenfrequency-analysis?parent=structural-mechanics-0182-212> ;
- 3) *Microsistemi, Andrea Nannini.*