

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica
Dipartimento di Elettronica e Informazione



SVILUPPO DI INNOVATIVI GIROSCOPI MEMS BASATI SU ELEMENTI PIEZORESISTIVI NANOSTRUTTURATI

Relatore: Prof. Antonio LONGONI
Correlatore: Prof. Giacomo LANGFELDER

Tesi di Laurea Specialistica di:
Federico GIACCI
Matr. n. 766184

Anno Accademico 2012-2013

*“Se vuoi costruire una nave non radunare gli uomini
per raccogliere legna e distribuire compiti,
ma insegna loro la nostalgia del mare”*

Antoine de Saint-Exupéry

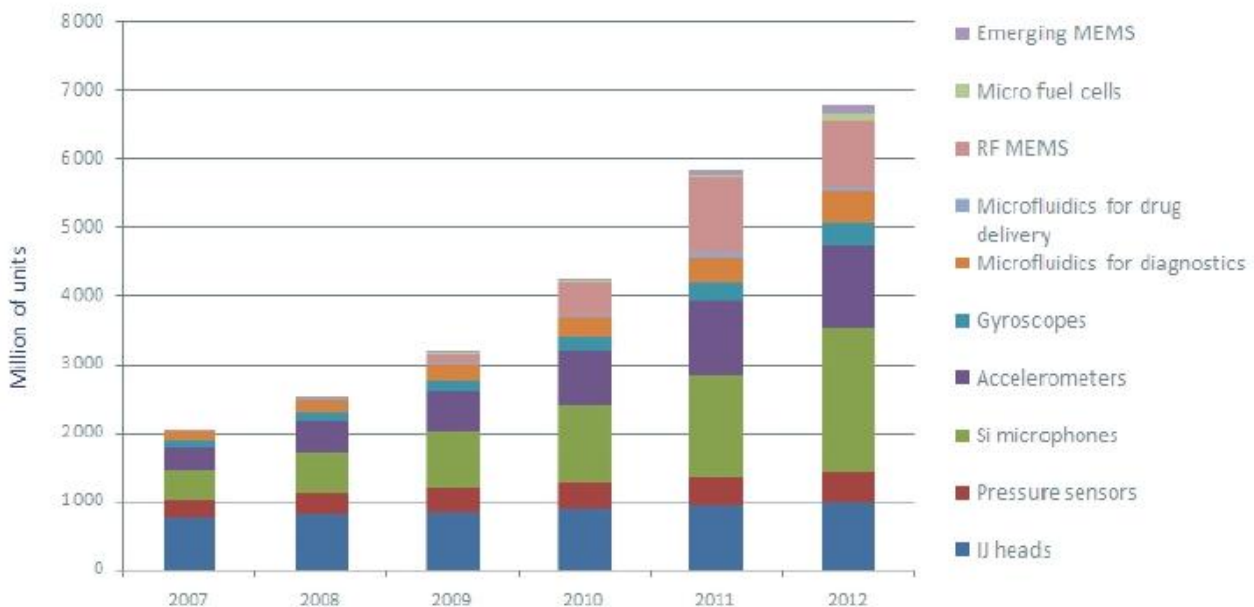
Indice

Introduzione	5
Capitolo 1 . Principio di funzionamento del giroscopio MEMS	8
Sistema massa-molla smorzato	8
La forza di Coriolis.....	11
Principio di funzionamento	13
Forza elettrica tra i piatti di un condensatore	16
Attuazione capacitiva: parallel plates e comb fingers	17
Lettura capacitiva: parallel plates.....	20
Capitolo 2 . Il giroscopio N/MEMS: funzionamento e prime scelte di progetto	23
Più frames e tuning fork	23
Specifiche del progetto.....	26
Lettura con nanogauge	29
Il fattore Γ	31
Ottimizzazione del sistema leva-nanogauge: z-gyro.....	31
Sensitività.....	35
Ponte di Wheatstone.....	37
Mismatch dei modi: banda del giroscopio e nuova sensitività.....	38
Sorgenti dello smorzamento.....	43
Capitolo 3 . Rumore	47
Sorgenti di rumore.....	47
Specifiche del progetto: la regione dei possibili punti di lavoro	54
Capitolo 4 . Simulazioni.....	57
z-gyroscopi: sHape	62
z-gyroscopi: LIBRA	69

xy giroscopio: proXY	75
Errore di quadratura: definizione e origine	81
Effetti dell'errore di quadratura sui nostri giroscopi	82
Una tecnica di compensazione	85
Capitolo 5 . Layout.....	87
sHape	87
LIBRA	88
proXY	88
Capitolo 6 . Conclusioni.....	89
Capitolo 7 . Appendici	93
Appendice A: Flusso di processo Leti.....	93
Appendice B: andamenti di rumore e S/N.....	94
Appendice C: modi di ordine superiore	105
Bibliografia	111
Ringraziamenti	113

Introduzione

I MEMS (microelectromechanical systems) sono oggetti in grado di misurare grandezze fisiche in base all'effetto da esse provocato su una massa libera di muoversi e connessa a punti vincolati grazie a molle: da magnetometri, basati sulla forza di Lorentz, ad accelerometri, a giroscopi, basati sulla forza di Coriolis, fino a sensori di pressione e microfoni. Il mercato dei MEMS negli ultimi anni sta assistendo ad una continua crescita ed alla nascita e consolidazione di nuovi sistemi che integrano diversi dispositivi e quindi diverse e/o più performanti funzionalità, come mostrato nella figura sottostante. Sicuramente uno dei fattori che rende i MEMS particolarmente interessanti è il fatto che il loro flusso di processo è quello CMOS: questo permette di avere l'elettronica di lettura integrata con il sensore su un unico chip, oltre a dimensioni micrometriche delle componenti strutturali dei dispositivi. D'altra parte le specifiche di progetto di tali strutture non potranno non tener conto del particolare nodo tecnologico del flusso di processo di produzione dei circuiti integrati: questo si tradurrà per esempio in limiti alla potenza dissipata, alle alimentazioni disponibili, ai minimi pattern disegnabili, con influenza sulla geometria delle molle e di altri elementi. Le applicazioni spaziano dal campo della navigazione assistita e della robotica, a quello aerospaziale, fino alla biomedicina. L'applicazione più diffusa rimane, comunque, l'elettronica consumer.



Source: YOLE DÉVELOPPEMENT

Accanto ai MEMS, si stanno sviluppando anche sistemi che integrano elementi di grandezza nanometrica: si parla di N/MEMS (nano/microelectromechanical systems); tecnologie sempre più avanzate permettono la realizzazione di tali elementi nanostrutturati, che, integrati con il resto del sistema, permettono la realizzazione della sua funzionalità ma con alcuni notevoli vantaggi come una maggior sensibilità, una minore potenza dissipata e una minor occupazione di spazio, rispetto ad altre soluzioni [1-2-3-4]. Tali tecnologie consentono di andare oltre lo stato dell'arte in diversi campi, come esempio le applicazioni consumer, di cui si occupa il presente lavoro.

Questo lavoro di tesi si colloca all'interno dello sviluppo di un progetto europeo della durata di tre anni: il progetto Nirvana, acronimo di nine-axis inertial sensor based on piezoresistive nanogauge detection. L'obiettivo di tale progetto è la realizzazione di un sistema di rilevamento a 9 assi, costituito da nove MEMS: tre accelerometri, ciascuno sensibile all'accelerazione lungo un asse, tre giroscopi e tre magnetometri. La parte relativa ai giroscopi vede coinvolti il Politecnico di Milano (in particolare il Dipartimento di Elettronica e Informazione) per il disegno delle strutture; il Fraunhofer Institute per il progetto dell'elettronica di lettura e l'azienda francese Leti, specializzata in nanotecnologie e, in particolare, nello sviluppo di MEMS e NEMS, per la produzione delle prime strutture, di test, e di quelle definitive. Le principali applicazioni riguardano da una parte la navigazione assistita e il controllo di stabilità dei veicoli, dall'altra la biomedicina; in particolare, si prevede infatti di sperimentare l'applicazione di un giroscopio triassiale all'interno dell'orecchio, al fine di fornire al sistema nervoso le informazioni (accelerazione, velocità di rotazione) non più fornite dall'apparato stato-cinetico danneggiato da eventi traumatici o patologie. Grazie alla tecnologia di cui Leti dispone, è possibile produrre MEMS con elementi nanostrutturati, che consentono un'innovativa modalità di lettura del segnale ed un notevole risparmio di spazio e di potenza dissipata. È stato necessario ricercare la struttura che ottimizzasse l'utilizzo di tali elementi, riferendosi a soluzioni e risultati riportati da Leti in alcuni articoli e, allo stesso tempo, proponendo nuove geometrie.

Il lavoro di tesi è consistito in primo luogo nel disegno, simulazione e caratterizzazione con Comsol Multiphysics delle strutture dei giroscopi, soggette a continui raffinamenti volti ad una sempre più completa ottimizzazione rispetto alle specifiche di progetto; in secondo luogo il lavoro è stato dedicato ad una modellizzazione teorica del funzionamento di tali strutture, attraverso la stesura di opportuni codici su Matlab. Grazie ad essi è stato possibile valutarne alcuni parametri caratteristici ed il rispetto delle specifiche del progetto; è stato, inoltre, possibile studiare i cambiamenti più convenienti da apportare alle strutture, prevedendone già l'effetto sul rumore del giroscopio, sul suo rapporto segnale/rumore e sul suo funzionamento complessivo. Sono stati

simulati gli effetti di accelerazioni indesiderate sull'intero giroscopio, così come l'errore, che inevitabilmente sarà presente per le tolleranze di processo, causato da asimmetrie presenti nella struttura volutamente introdotte. È stato osservato, attraverso i software utilizzati, come le specifiche di progetto, e le regole di processo di Leti, siano sostanzialmente soddisfatte, anche se per alcune di esse si riconosce un ulteriore margine di miglioramento, con conseguenti modifiche delle strutture. Nell'ottica di una prosecuzione di tale lavoro sono state disegnate con Cadence i layout definitivi delle prime strutture, affinché vengano prodotte e, poi, testate.

Si presentano, in questa tesi, innanzitutto il principio di funzionamento dei giroscopi MEMS e alcune prime soluzioni esemplificative. Si introduce, poi, l'utilizzo di un elemento nanostrutturato, detto nanogauge, basato sulla proprietà di piezoresistività che il silicio presenta con sezioni nanometriche. Si trattano, successivamente, le sorgenti di rumore del giroscopio N/MEMS. Si presentano, infine, i risultati della modellizzazione delle strutture e delle loro simulazioni. Nelle conclusioni vengono tracciate le linee di progetto che verranno seguite prossimamente, motivandole opportunamente attraverso l'utilizzo del codice MatLab per la modellizzazione dei giroscopi.

Capitolo 1 . Principio di funzionamento del giroscopio MEMS

In questo capitolo saranno discussi gli strumenti principali per comprendere il principio di funzionamento del giroscopio MEMS: gli spostamenti delle parti che lo costituiscono, infatti, sono quelli di masse appartenenti a sistemi massa-molla smorzati; le velocità di rotazione sono rilevate grazie all'insorgere di una forza di Coriolis su una massa messa precedentemente in moto. Tale moto, che rende sensibile la massa alle velocità di rotazione, è detto moto di drive. A partire dallo studio della forza elettrica esistente tra i piatti di un condensatore, si esporrà come si possa generare elettricamente il moto di drive, e una modalità di lettura degli spostamenti causati dalla forza di Coriolis.

Sistema massa-molla smorzato

Tra gli strumenti necessari per comprendere e modellizzare il dispositivo in esame, il primo è lo studio del sistema massa-molla smorzato. Consideriamo, dunque, una massa m connessa a una molla, connessa a sua volta a un punto vincolato, che chiameremo ancoraggio, come in figura 1.1. La molla tende sempre a riportare la massa nello stato di equilibrio “reagendo” ogni volta che essa si trovi fuori dalla posizione di riposo con una forza elastica proporzionale al suo spostamento; il fattore di proporzionalità è la rigidezza elastica k , prima proprietà di una molla. Così avremo:

$$(1) \quad F_{el} = kx$$

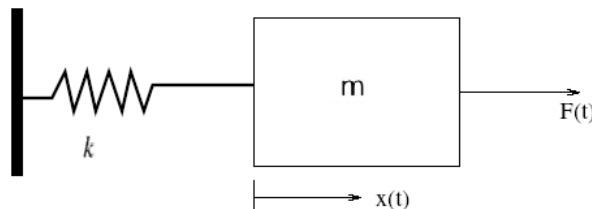


Figura 1.1: illustrazione schematica di un sistema massa-molla.

Per descrivere più correttamente il funzionamento del dispositivo è necessario tener conto di una fondamentale non idealità: quando la massa si sposta urta con le particelle presenti nell'ambiente circostante, subendo così una dissipazione della sua energia che necessariamente dipenderà dalla quantità di particelle presenti, cioè in ultima istanza dalla pressione; è come se ci fosse una forza di damping (smorzamento) che si oppone al moto della massa, che si osserva sperimentalmente essere tanto maggiore quanto più è grande la velocità della stessa. Di questo fenomeno si tiene conto introducendo il fattore di smorzamento b [5], che stabilisce una relazione di linearità tra la suddetta forza e la velocità della massa:

$$(2) \quad F_{damp} = b\dot{x}$$

Il sistema si può ora schematizzare come in figura 1.2.

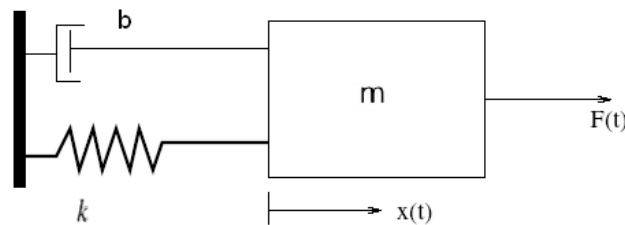


Figura 1.2: illustrazione schematica di un sistema massa-molla smorzato.

Per il secondo principio di Newton, in ogni istante l'accelerazione di un corpo è determinata dalla forza non equilibrata che agisce su di esso: l'accelerazione ha la stessa direzione e lo stesso verso della forza, con modulo proporzionale alla forza e inversamente proporzionale alla massa. Quindi:

$$(3) \quad F = m\ddot{x}$$

Si può, a questo punto, scrivere una sola equazione descrittiva del sistema: la forza non equilibrata che agisce sulla massa sarà una generica forza esterna F_{ext} , che sarà però contrastata dall'azione della molla e dall'esistenza di uno smorzamento, quindi $F_{ext} - b\dot{x} - kx$. Per il secondo principio di Newton si avrà: $m\ddot{x} = F_{ext} - b\dot{x} - kx$ ovvero

$$(4) \quad m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_{ext}$$

E' di interesse calcolare il trasferimento tra F_{ext} e spostamento della massa, al variare della frequenza della forza in ingresso. Per questo fine, utilizziamo il potente strumento della trasformata di Laplace. Trasformando il primo e secondo termine dell'equazione, e rispettando le regole delle trasformate, si ottiene:

$$ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s) = F_{ext}(s)$$

Di qui, si ha:

$$X(s) = \frac{1}{k} \frac{1}{\frac{m}{k}s^2 + \frac{b}{k}s + 1} F_{ext}(s)$$

Definiamo ora due parametri caratteristici di ogni sistema massa molla smorzato: la pulsazione di risonanza, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ e il fattore di qualità $Q = \frac{\sqrt{km}}{b}$. Passando alle trasformate di Fourier (imponendo $s = j\omega$) possiamo allora riscrivere il trasferimento

$$(5) \quad T_{FX}(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F_{ext}(j\omega)} = \frac{1}{k} \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + \frac{1}{Q\omega_0}j\omega}$$

Calcolandone il modulo,

$$(6) \quad |T_{FX}(j\omega)| = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})^2 + (\frac{1}{Q\omega_0}\omega)^2}}$$

Quando la forza in ingresso ha una pulsazione bassa rispetto a ω_0 , il trasferimento è semplicemente $1/k$, come accadrebbe per un sistema senza smorzamento. Quando invece la forza ha una pulsazione molto superiore a ω_0 , il trasferimento è nullo. In figura 1.3 sono rappresentate tre funzioni di trasferimento a diversi fattori di qualità, cioè a diversi smorzamenti; è di interesse studiare il massimo del trasferimento per un sistema sotto-smorzato ($Q \gg 0.5$): esso si ha a $\omega = \omega_0$, e vale

$$|T_{FX}(j\omega_0)| = \frac{Q}{k}$$

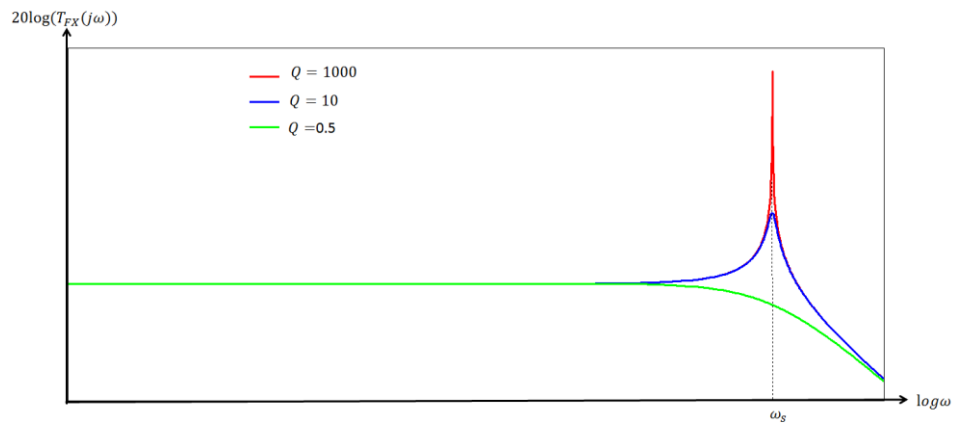


Figura 1.3: funzioni di trasferimento di sistemi massa-molla diversamente smorzati.

La forza di Coriolis

La forza di Coriolis nasce quando un sistema è sottoposto a rotazione rispetto ad un altro. Essa è osservabile ponendosi nel sistema di riferimento messo in rotazione, e questo è ciò che la rende di interesse per la creazione di un dispositivo che riveli le rotazioni che esso stesso subisce.

Consideriamo il sistema di riferimento $x'y'z'$: esso ruota con velocità angolare ω_a rispetto al sistema xyz , come in figura 1.4. L'origine del sistema $x'y'z'$, O' , è individuata, rispetto al sistema xyz , dal vettore $\vec{r}_{O'a}$. Il generico punto P nel sistema di riferimento $x'y'z'$ è descritto dal vettore \vec{r}_{Pr} .

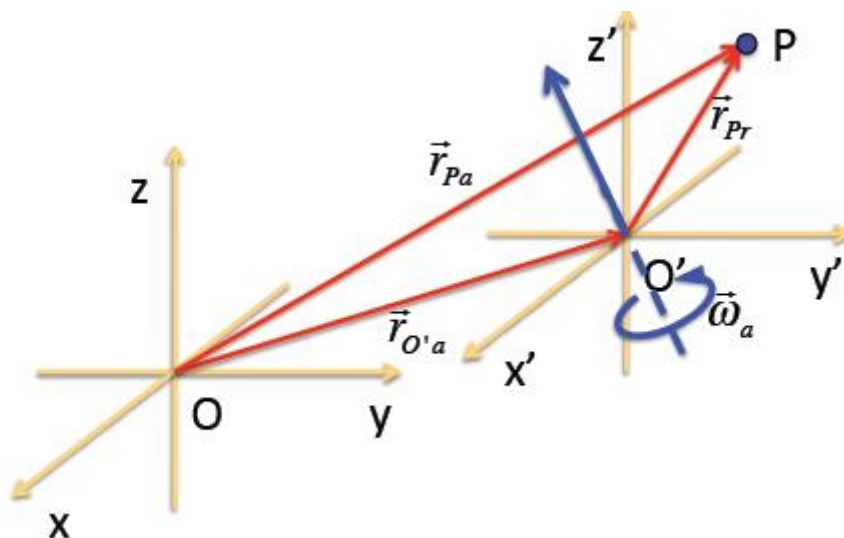


Figura 1.4: i sistemi xyz , di riferimento, e $x'y'z'$, rispetto ai quali è descritto un punto P .

La posizione assoluta di P è data da

$$\vec{r}_{Pa} = \vec{r}_{Pr} + \vec{r}_{O'a}$$

la velocità del punto P rispetto al sistema di riferimento xyz si dimostra essere

$$\vec{v}_{Pa} = \vec{v}_{Pr} + \vec{v}_{O'a} + \vec{\omega}_a \times \vec{r}_{Pr}$$

Dove \vec{v}_{Pr} è la velocità di P rispetto al sistema x'y'z', $\vec{v}_{O'a}$ la velocità del sistema x'y'z' rispetto al sistema xyz; definendo la velocità di trasporto come

$$\vec{v}_{TR} = \vec{v}_{O'a} + \vec{\omega}_a \times \vec{r}_{Pr}$$

si ottiene

$$\vec{v}_{Pa} = \vec{v}_{TR} + \vec{v}_{Pr}$$

La velocità assoluta (cioè rispetto al sistema xyz) \vec{v}_{Pa} dipende dal moto di P rispetto al sistema x'y'z' (espresso da \vec{v}_{Pr}) e da rotazioni e traslazioni del sistema x'y'z' rispetto al sistema xyz, espressi da \vec{v}_{TR} . L'accelerazione di P assoluta sarà

$$\begin{aligned} \vec{a}_{Pa} &= \frac{d}{dt} \vec{v}_{Pr} + \frac{d}{dt} \vec{v}_{TR} = \vec{a}_{Pr} + \vec{a}_{O'a} + \vec{\omega}_a \times \vec{r}_{Pr} + \vec{\omega}_a \times (\vec{\omega}_a \times \vec{r}_{Pr}) + \\ &\quad + 2\vec{\omega}_a \times \vec{v}_{Pr} \end{aligned}$$

Definiamo ora l'accelerazione di Coriolis

$$\vec{a}_C = 2\vec{\omega}_a \times \vec{v}_{Pr}$$

e l'accelerazione di trasporto

$$\vec{a}_{TR} = \vec{a}_{O'a} + \vec{\omega}_a \times \vec{r}_{Pr} + \vec{\omega}_a \times (\vec{\omega}_a \times \vec{r}_{Pr})$$

così che si ottiene

$$\vec{a}_{Pa} = \vec{a}_{Pr} + \vec{a}_{TR} + \vec{a}_C$$

Da qui si ricava l'accelerazione relativa, che si rileva nel sistema di riferimento sottoposto a rotazione, x'y'z'

$$\vec{a}_{Pr} = \vec{a}_{Pa} - \vec{a}_{TR} - \vec{a}_C$$

Passando dalle accelerazioni alle forze attraverso il secondo principio di Newton, definiamo una forza assoluta

$$\vec{f}_{Pa} = m\vec{a}_{Pa}$$

una forza di trasporto

$$\vec{f}_{TR} = -m\vec{a}_{TR} = -m(\vec{a}_{O'a} + \vec{\omega}_a \times \vec{r}_{Pr} + \vec{\omega}_a \times (\vec{\omega}_a \times \vec{r}_{Pr}))$$

e una forza di Coriolis

$$(7) \quad \vec{f}_C = -m\vec{a}_C = -2m\vec{\omega}_a \times \vec{v}_{Pr}$$

così che, essendo la forza relativa $\vec{f}_{Pr} = m\vec{a}_{Pr}$, la si può scrivere come

$$\vec{f}_{Pr} = m\vec{a}_{Pr} = m(\vec{a}_{Pa} - \vec{a}_{TR} - \vec{a}_C) = \vec{f}_{Pa} + \vec{f}_{TR} + \vec{f}_C.$$

Definiamo, a questo punto, una forza di inerzia

$$\vec{f}_{inerz} = \vec{f}_{TR} + \vec{f}_C.$$

Da letteratura [6] è noto che la forza di trascinamento è trascurabile rispetto alla forza di Coriolis; per questo si ha

$$(8) \quad \vec{f}_{inerz} \cong \vec{f}_C$$

Principio di funzionamento

Come già si è accennato, la forza di Coriolis è di grande interesse perché la si rileva nel sistema di riferimento posto in rotazione, e questo è fondamentale per un dispositivo che rilevi le rotazioni cui esso stesso è sottoposto. Per rendere osservabile l'esistenza di una forza di Coriolis, si consideri l'esperimento descritto dalla figura 1.5: un carrello è libero di muoversi a velocità \vec{v}_R in direzione x' (e verso opposto a tale asse) su una rotaia, mentre il sistema di riferimento $x'y'$ ruota a una velocità di rotazione $\vec{\omega}_a$; ad esso è connessa, tramite una molla di rigidezza elastica k , una massa, anch'essa, quindi, in moto con velocità \vec{v}_R . Trascurando \vec{f}_{TR} , la forza \vec{f}_C , di direzione ortogonale alla

velocità iniziale poiché, come si è visto in precedenza, $\vec{a}_C \propto \vec{\omega} \times \vec{v}$, agirà su tutto il sistema in moto, ma, a differenza della massa, il carrello è vincolato in direzione y' . Così si avrà, in condizione di equilibrio, una forza elastica \vec{f}_M , dovuta alla molla, di richiamo della massa. Nel sistema di riferimento $x'y'$ si potrà osservare un'estensione statica della molla che, all'equilibrio, rivela l'esistenza della forza di Coriolis.

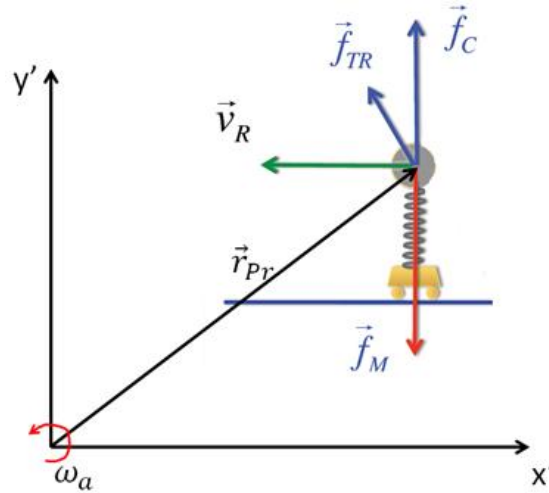


Figura 1.5: all'equilibrio si rileva un'estensione statica della molla: la sua forza di richiamo bilancia la forza di Coriolis.

Per ottenere un giroscopio, quindi, sarà necessario avere una massa che anche in assenza di rotazioni si muova in una data direzione con una certa velocità \vec{v} , così che all'insorgere di una rotazione corrisponda la contemporanea nascita di una forza di Coriolis ortogonale a \vec{v} , come in figura. La forza che consente tale moto originario è detta forza di drive e, come si vedrà in seguito, è generata elettricamente nei sistemi micro-elettro-meccanici. Tale massa sarà necessariamente connessa a vincoli, detti ancoraggi, attraverso opportune molle, che dovranno consentire lo spostamento nelle due direzioni ortogonali di \vec{v} e \vec{f}_C . Ogni spostamento della massa, inoltre, sarà sempre soggetto ad uno smorzamento. Così la stessa massa partecipa a due sistemi massa-molla smorzati: il primo è quello che descrive il moto della molla nella direzione di \vec{v} , detto moto di drive perché è il moto a cui la massa è “guidata” da opportune forze elettriche; il secondo sistema è quello che descrive il moto dovuto alla forza di Coriolis, detto moto di sense perché è grazie a questo moto e ad opportuni sistemi di sensing, che si discuteranno in seguito, che si rivela l'esistenza di una velocità angolare. Ognuno dei due sistemi massa-molla smorzati sarà, dunque, caratterizzato da una rigidità elastica, k_D , relativa al moto di drive, e k_S , relativa al sense, un fattore di smorzamento, b_S e b_D , e, di conseguenza, un fattore di qualità Q_D e Q_S e una frequenza di risonanza, ω_D e ω_S . Ricordando che la forza di Coriolis è $\vec{f}_C \propto \omega_a \times \vec{v}$, allora, considerato il dispositivo schematico in

figura 1.6, in presenza di una velocità di rotazione ortogonale al piano del sistema, il moto della massa potrà essere scomposto in un moto di drive e in uno di sense nel piano del sistema stesso, come rappresentato. Considerate le figure 1.7 e 1.8, con una velocità di rotazione nel piano del dispositivo, ma sempre ortogonale alla direzione di drive (se no non si avrebbe una forza di Coriolis) risulta un moto di sense ortogonale al piano. Si assuma che le molle rappresentate nelle figure 1.6, 1.7 e 1.8 consentano alla massa mobile spostamenti in tutte e tre le direzioni; come si descriverà in seguito, nella realizzazione dei tre giroscopi saranno necessarie diverse geometrie delle molle. Si osserva come, per motivi di processo, si debbano necessariamente avere una massa con una matrice di fori ad una distanza reciproca dettata dalla tecnologia. Con l'unione di tre dispositivi opportunamente orientati si riesce, dunque, a rivelare una velocità di rotazione comunque direzionata, rivelandone, con i tre sistemi, le tre componenti che la costituiscono.

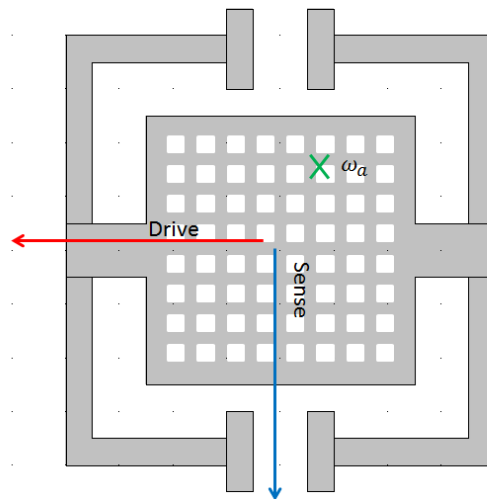


Figura 1.6: z-gyro.

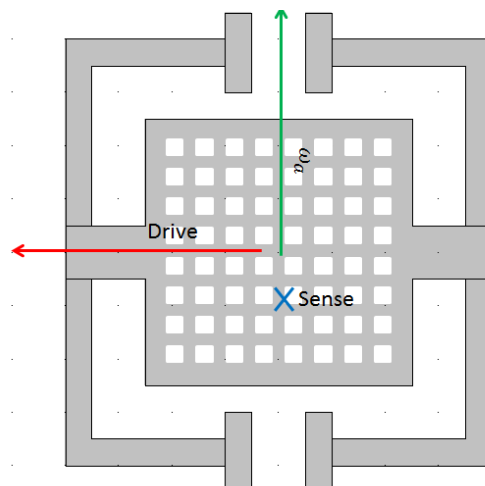


Figura 1.7: y-gyro.

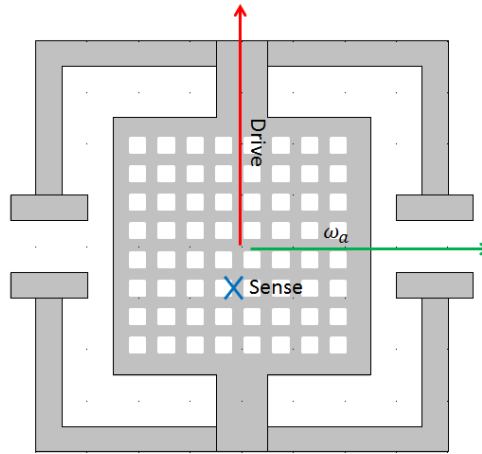


Figura 1.8: x-gyro.

Forza elettrica tra i piatti di un condensatore

Come si è discusso in precedenza, per il corretto funzionamento di un giroscopio, è necessario che venga generata una forza di drive. Considerato un generico condensatore, esso vede agire tra i suoi due piatti una forza elettrica che tende ad unirli, contrastata da una forza meccanica che, invece, li tiene separati. Se, però, uno dei due piatti è mobile, come nel caso di un condensatore MEMS, allora si avrà un moto relativo dei piatti uno verso l'altro dipendente dalla tensione applicata. L'entità della forza che agisce tra i piatti si può calcolare facendo uso del principio dei lavori virtuali. Consideriamo un condensatore con una tensione V ai suoi capi, fissata da un generatore di tensione; il piatto superiore è libero di muoversi, quello inferiore è vincolato. Come detto prima, ci saranno una forza elettrica e una meccanica uguali ed opposte, come in figura 1.9.

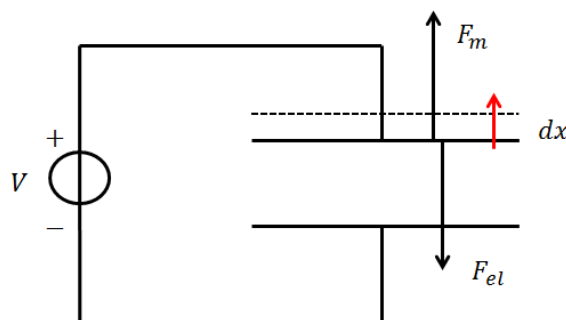


Figura 1.9: bilancio di forze sul piatto mobile di un condensatore polarizzato.

Poniamo di spostare di una quantità dx il piatto superiore, come rappresentato in figura; conseguirà, allora, una dissipazione di energia dE_C dovuta al lavoro che la forza meccanica F_m compie, pari a $dW_m = F_m dx$ e al lavoro compiuto dal generatore di tensione, pari a VdQ . Quindi si avrà

$$dE_C = F_m dx + VdQ,$$

dove $E_C = \frac{1}{2}CV^2$ e $dE_C = \frac{1}{2}dCV^2 + CVdV = \frac{1}{2}dCV^2$ (infatti la tensione ai capi del condensatore è fissa). D'altra parte $VdQ = V(CdV + VdC) = V^2dC$. Quindi si ha $\frac{1}{2}V^2dC = V^2dC + F_m dx$, e, quindi,

$$(9) \quad F_m = -\frac{1}{2}V^2 \frac{dC}{dx}$$

Abbiamo trovato l'espressione generale della forza meccanica, che all'equilibrio è uguale a quella elettrica, tra i piatti di un condensatore con tensione fissa ai capi. Come era prevedibile, dipende da V ed è sempre una forza attrattiva, qualsiasi sia la tensione applicata. Come ora sarà discusso, è questa la forza che si utilizza per realizzare il moto di drive della massa mobile. Questo è reso possibile dal fatto che essa è costituita di silicio monocristallino.

Attuazione capacitiva: parallel plates e comb fingers

Consideriamo due piatti affacciati, di area A e distanti a riposo x_0 e supposto uno libero di muoversi lontano dall'altro come in figura 1.10, dunque applichiamo la formula prima dimostrata: $F_{el} = -\frac{1}{2}V^2 \frac{dC}{dx}$, dove $C = \frac{\epsilon_0 A}{x}$, si ha

$$F_{el} = \frac{1}{2}V^2 \epsilon_0 A \frac{1}{x^2}$$

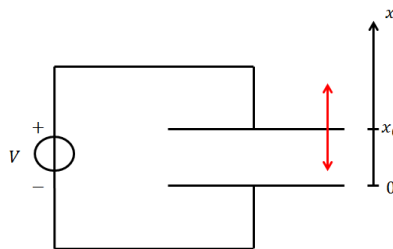


Figura 1.10: condensatore polarizzato con un piatto mobile ed uno vincolato, con un asse di riferimento.

Un'attuazione basata su parallel plates presenta una criticità: la forza dipende dallo spostamento e con una relazione non lineare per la quale la forza cresce col diminuire dello spostamento, oltretutto elevato al quadrato: questo significa che con bassi spostamenti la forza esplode e c'è la concreta possibilità che i piatti si attacchino uno all'altro. Si può porre rimedio a questo tramite bumps, ingrossamenti della superficie di uno dei due piatti che riducono la superficie che aderisce al primo piatto.

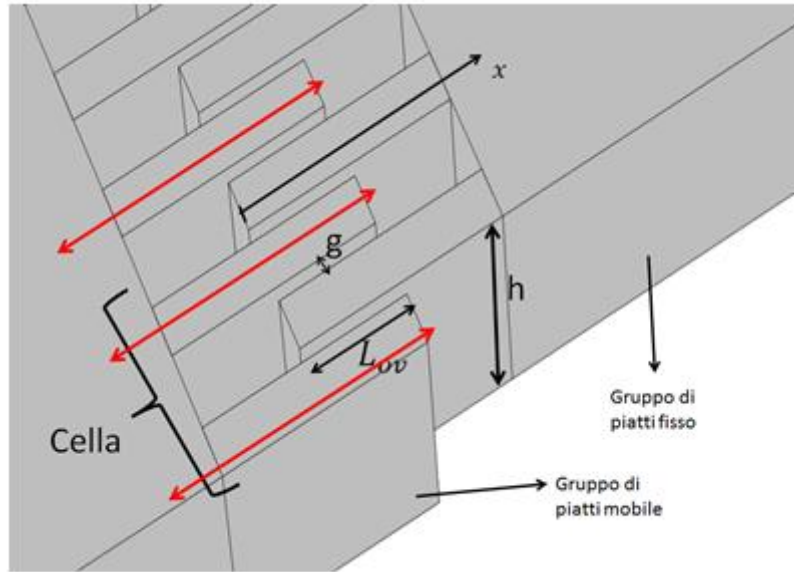


Figura 1.11: comb fingers e loro caratteristiche geometriche.

In genere, comunque, si ricorre a un secondo tipo di attuazione: a comb fingers. In questo secondo caso lo spostamento relativo tra i piatti non è frontale, ma laterale, come descritto in figura 1.11. Il piatto fisso e il piatto mobile sono sostituiti da un gruppo di piatti fissi e un gruppo di piatti mobili, che si affacciano lateralmente a riposo di L_{ov} . Sono distanti g e alti h (l'altezza di processo). L'unità fondamentale è la cella, costituita da una coppia di piatti mobili tra i quali c'è un piatto fisso. In generale assumiamo che esistano N_{cell} celle. La forza elettrica relativa a una coppia di piatti è $F_{el} = \frac{1}{2} V^2 \frac{d}{dx} \left(\frac{\epsilon_0 x h}{g} \right) = \frac{1}{2} V^2 \frac{\epsilon_0 h}{g}$. Per ottenere la forza complessiva bisogna tener conto del fatto che, per come è fatta la geometria a comb fingers, se un piatto della parte mobile si sposta, l'effetto appena descritto di generazione di una forza vale due volte, perché ogni piatto si affaccia su altri due piatti, e vale per tutte le celle, così si avrà

$$(10) \quad F_{el} = 2N_{cell} \frac{1}{2} V^2 \frac{\epsilon_0 h}{g}$$

Per avere uno spostamento massimo della massa mobile, è necessario che la forza di drive sia sinusoidale alla frequenza di drive. Per ottenere questo, si polarizzano opportunamente la massa mobile e i piatti fissi. Una possibilità è quella rappresentata in figura 1.12. La massa mobile è connessa al substrato grazie alle molle, che la vincolano concedendole, però, gli opportuni gradi di libertà perché avvengano tutti i moti di interesse.

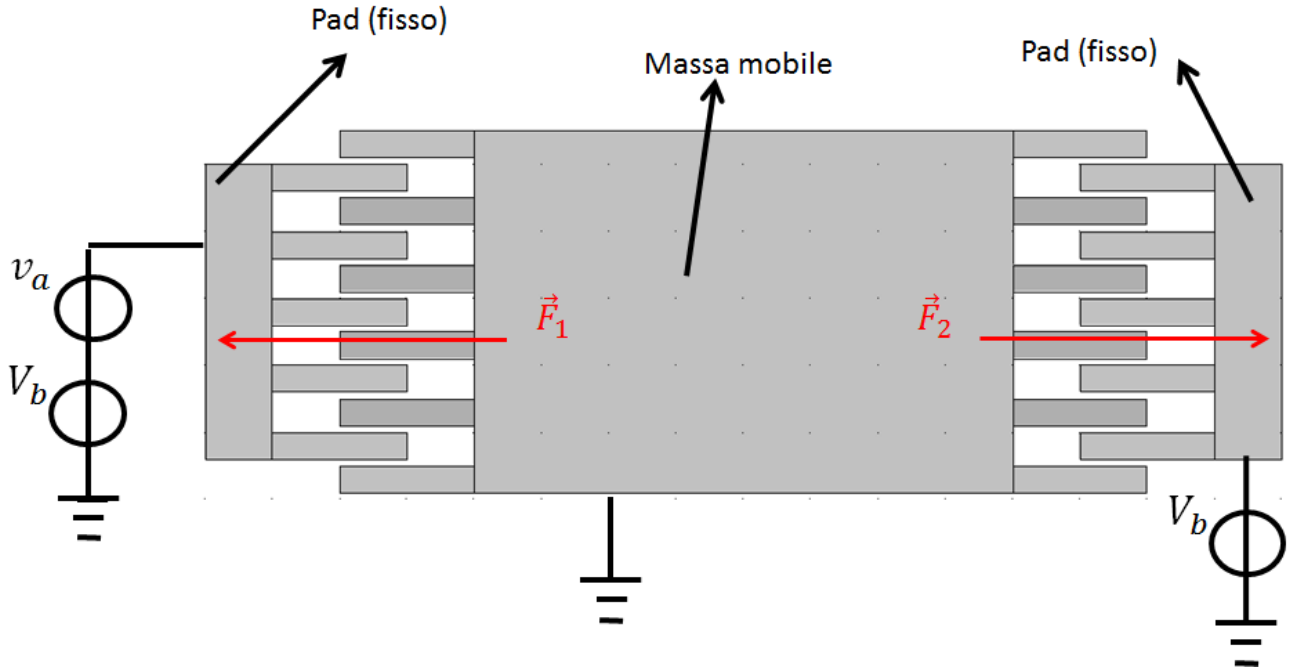


Figura 1.12: illustrazione schematica della disposizione di comb fingers su massa mobile ed elettrodi fissi.

Considerata la figura 1.12, V_b è una tensione di polarizzazione fissa e v_a è una tensione tempo variante: $v_a = v_a(t) = v_{a,0}\sin(2\pi ft)$. Si avranno le forze \vec{F}_1 ed \vec{F}_2 sulla massa mobile, e quindi la forza totale che agisce sulla massa è $F_{tot} = F_2 - F_1 = 2N_{cell}\frac{1}{2}V_b^2\frac{\epsilon_0 h}{g} - -2N_{cell}\frac{1}{2}(V_b - v_a)^2\frac{\epsilon_0 h}{g}$; svolgendo i calcoli ed assumendo che $v_{a,0} \ll V_b/2$, che è un'assunzione generalmente vera, si ottiene

$$F_{tot}(= F_D) = \frac{2\epsilon_0 h N_{cell} V_b v_a}{g}$$

Così se v_a è una tensione sinusoidale a pulsazione pari a ω_D , si avrà la desiderata forza di drive risonante e un conseguente spostamento massimo della massa mobile. Si osservi come la forza non

dipenda dallo spostamento, ma sia costante per ogni posizione assunta dalla massa mobile: questo diminuisce notevolmente la possibilità che i piatti del condensatore a comb fingers si uniscano uno all'altro, dato che una loro vicinanza non determina una maggiore attrazione reciproca; il meccanismo non diverge. Si osserva come non sia consigliabile la semplice applicazione di $v_a(t)$ a un solo pad, lasciando a 0V la massa mobile e l'altro pad: questo comporterebbe una posizione media della massa mobile non simmetrica rispetto ai due pads, ma più spostata verso il pad polarizzato, poiché $F_{el} \propto V^2$.

Lettura capacitiva: parallel plates

Da ora ci si riferirà a un giroscopio che rivela velocità angolari lungo l'asse z, detto d'ora in avanti z-gyro e ci si riferirà ad una terna di assi come in figura 1.13.

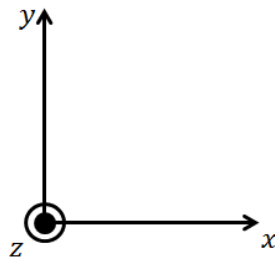


Figura 1.13: terna di assi di riferimento.

Un diffuso metodo di rivelazione di spostamenti in direzione y della massa mobile, dovuti a una rotazione, è quello basato su parallel plates [7]. Esso si avvale del fatto che, fissata la tensione ai capi di un condensatore, se la distanza tra i suoi piatti subisce variazioni, della carica sarà iniettata o richiamata dal condensatore nei confronti del resto del circuito. Così una tipica soluzione proposta è quella mostrata in figura 1.14.

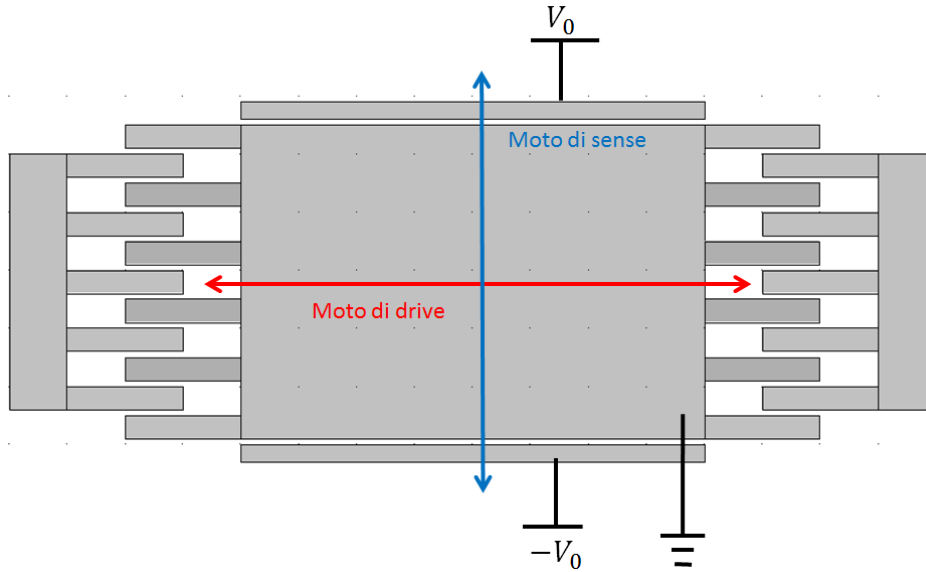


Figura 1.14: un z-gyro; polarizzazioni della massa mobile e dei piatti di sense.

Il circuito di lettura di spostamenti è tipicamente il seguente; il piatto intermedio schematizza la massa mobile.

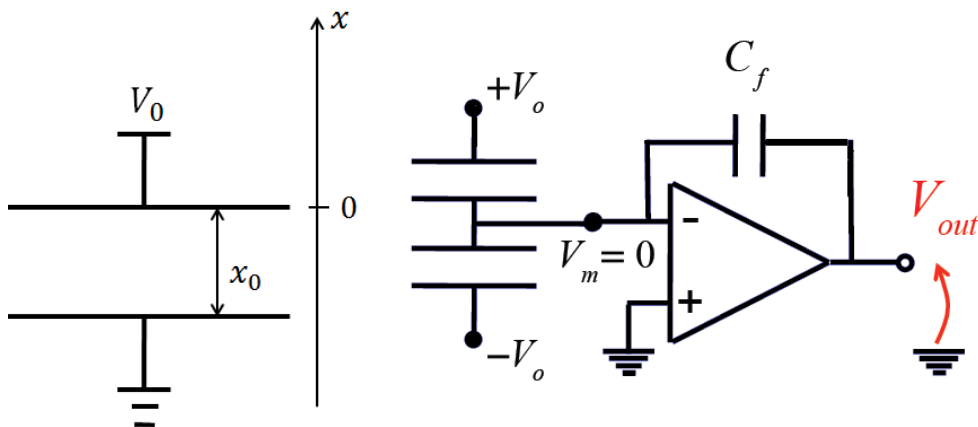


Figura 1.15: singolo condensatore e rappresentazione del sistema di readout.

Prendiamo in considerazione il singolo condensatore: la distanza a riposo tra i piatti è x_0 , la loro area è A e la capacità a riposo è $C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{x_0}$. A seguito di un generico spostamento verticale x dalla

posizione di equilibrio, si avrà una variazione della capacità $\Delta C = C(x) - C(0) = -C(0) \frac{\frac{x}{x_0}}{1 + \frac{x}{x_0}}$. Nel

caso di uno spostamento verso il basso si avranno due variazioni di capacità uguali ed opposte, ma entrambe contribuiranno in ugual misura ad un assorbimento di carica positiva dall'opamp. Infatti la capacità inferiore crescerà, e così più carica positiva sarà richiamata secondo la legge $Q = CV$, essendo fissata la tensione ai capi; la capacità superiore, invece, diminuirà, e così sarà iniettata

verso l'opamp della carica negativa, cioè richiamata carica positiva, che precedentemente era indotta sul piatto mobile affacciato sul piatto ad alimentazione positiva. Il fenomeno opposto accadrà se la massa mobile avrà uno spostamento verso l'alto. Ad ogni modo si avrà una iniezione o richiamo di carica pari a $\Delta Q = 2V_0\Delta C = [\text{per } x \ll x_0] = 2V_0C(0)\frac{x}{x_0}$. A questo punto, si avrà una tensione $V_{out} = 2V_0\frac{C(0)}{C_f}\frac{x}{x_0}$; come era desiderabile, essa è proporzionale allo spostamento verticale della massa mobile, che, come si vedrà meglio in seguito, è a sua volta proporzionale alla velocità di rotazione. Così si ha una relazione di proporzionalità tra grandezza fisica da misurare ed uscita del sistema di misura.

Capitolo 2 . Il giroscopio N/MEMS: funzionamento e prime scelte di progetto

In questo capitolo verranno illustrate delle prime linee progettuali già adottate in precedenza per rispondere a problemi come accelerazioni esterne e imperfezioni delle molle: alcune di queste, infatti, saranno utilizzate nel design delle nostre strutture. Verranno poi presentate le specifiche del progetto, confrontate con lo stato dell'arte: risulterà evidente la necessità di un passo tecnologico importante per rispettare alcune di esse, come ad esempio le dimensioni complessive del package; si discuterà di come tali specifiche possano essere rispettate anche grazie ad una nuova modalità di lettura, basata su un elemento di silicio con proprietà piezoresistive ed un'opportuna leva; è affrontato il problema di come questa innovazione si possa implementare per rilevare velocità angolari sul piano e fuori dal piano per poi parlare della sensitività del giroscopio, della prima elettronica di lettura e della necessità di mismatchare i modi di drive e sense affinché la banda del giroscopio rispetti le specifiche. Seguirà un accenno all'elaborazione del segnale in uscita dal giroscopio e alle sorgenti dello smorzamento cui tutte le masse mobili del giroscopio sono soggette nel loro moto.

Più frames e tuning fork

Finora si è sempre parlato di un giroscopio costituito da una sola massa libera di muoversi nella direzione di drive e di sense grazie ad opportune molle che la connettono ad ancoraggi [4]. Riferendosi sempre a un z-gyro, come in figura 1.6, ed alla terna di assi in figura 1.13, un problema importante per un sistema a singolo frame (massa mobile) è rappresentato da accelerazioni inerziali in direzione y esterne che la massa subisce. Il risultato di queste accelerazioni è un moto lungo y che il sistema di sensing “interpreta” come il frutto di una velocità angolare: così è introdotto dell'offset o disturbo nella misura. Per porre rimedio a questo, l'idea è avere nello stesso dispositivo, soggetto a suddette accelerazioni esterne, due masse che si muovono in antifase ([8-9]) grazie ad un opportuno sistema di drive e a molle che consentano questo, come rappresentato in figura 2.1. Così si avranno due masse sensibili a velocità angolari, che genereranno segnali di segno opposto perché opposte di verso sono le loro velocità. L'elettronica successiva dovrà eseguire una sottrazione di tali segnali per ottenere un segnale doppio rispetto al caso di singola massa.

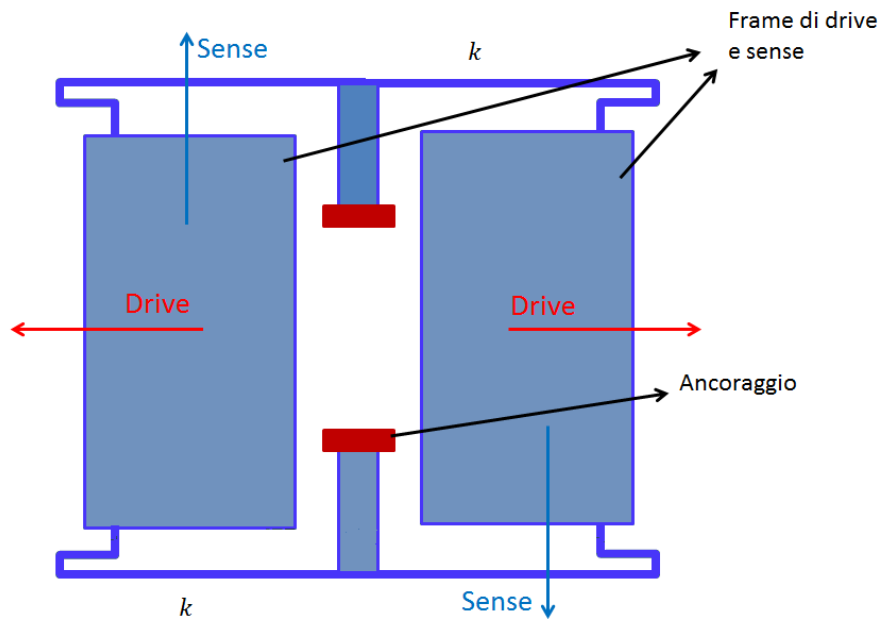


Figura 2.1: giroscopio accoppiato.

In questo modo le accelerazioni verticali, sentite da entrambe le masse, rappresentano un segnale di modo comune, rivelato da entrambi i sistemi di sensing ma eliminato dall'operazione di sottrazione eseguita dall'elettronica successiva.

Una seconda problematica rilevante riguarda l'errore nella misura dovuto a una non perfetta fabbricazione delle molle. Idealmente, infatti, il sistema di drive dovrebbe muovere le masse solo nella direzione di drive, nel nostro caso quella orizzontale, senza che il sistema di sensing rilevi alcunchè. Ma a causa di inevitabili imperfezioni nella fabbricazione delle molle, la forza di drive può avere una componente di moto verticale non trascurabile, e, di conseguenza, dare origine a un segnale indesiderato. Per questa ragione si ritiene vantaggioso [3-10-11-12] passare da una geometria ad un frame ad una geometria parzialmente disaccoppiata, come quella in figura 2.2.. Come si può osservare da questa stessa figura, la soluzione generalmente adottata per far fronte al problema delle accelerazioni verticali è l'utilizzo di un tuning fork, una molla di accoppiamento delle due masse mobili, fatte muovere in antifase da un opportuno sistema di driving. Il tuning fork favorisce l'oscillazione in antifase delle masse a una frequenza comune.

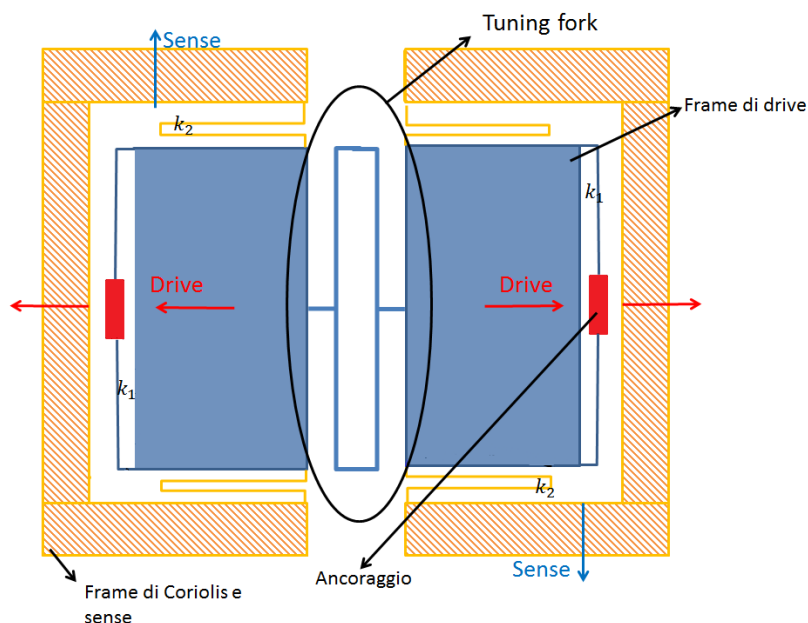


Figura 2.2: giroscopio parzialmente disaccoppiato.

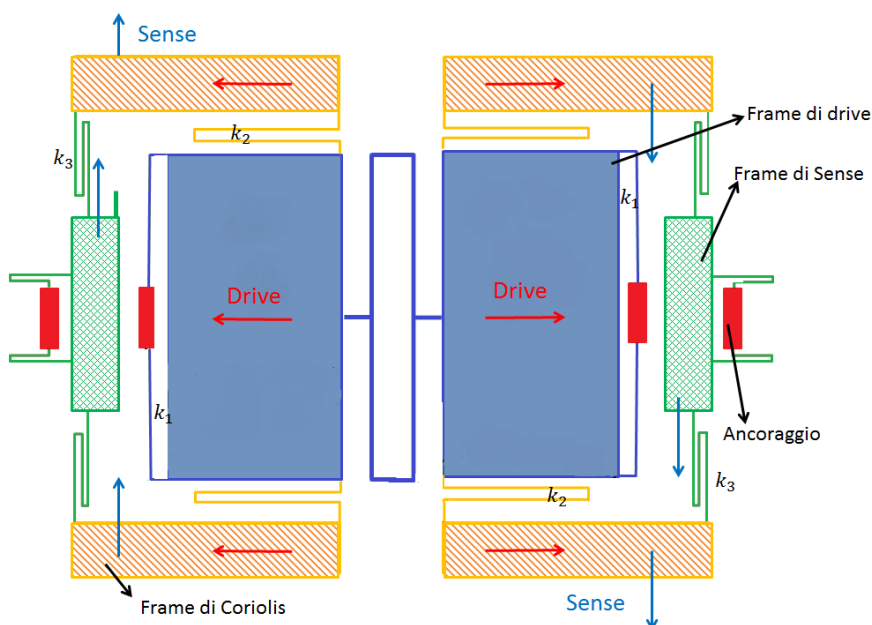


Figura 2.3: giroscopio completamente disaccoppiato.

Le molle di rigidezza elastica k_1 sono progettate in modo da consentire alle masse interne dette masse di drive, cui sono connesse, solo uno spostamento in direzione orizzontale: la loro rigidezza in direzione x è molto inferiore a quella in direzione y proprio per la loro geometria. Le masse più interne, dette di Coriolis (perché su di esse agisce una forza di Coriolis, in presenza di velocità angolari) o anche di sense (il loro spostamento in direzione y , infatti, è usato per generare segnale utile), si muoveranno solo in direzione x . Dall'altra parte le molle di rigidezza elastica k_2 , per come

sono progettate, tenderanno a trasferire il moto di drive delle masse interne a quelle più esterne, comunque permettendo a quest'ultime anche un moto in direzione verticale. Con questa geometria si ha, così, un parziale disaccoppiamento tra modi di drive e sense e si risolve in parte il problema di partenza: infatti le masse di drive trasferiscono a quelle di Coriolis o di sense solo un moto in direzione x , mentre eventuali moti lungo y non sono trasferiti dalle molle. Il problema si ripropone relativamente alla massa di sense: è il suo moto verticale ad essere rivelato, ma essa stessa si muove anche lungo x , e quindi la possibilità di un crosstalk tra modi rimane.

Una geometria a triplo frame o completamente disaccoppiata, in figura 2.3, si propone come una migliore soluzione. Come nel caso precedente, le molle di rigidezza elastica k_1 consentono solo spostamenti in direzioni orizzontali, e, di conseguenza, le masse di drive (interne) si muovono solo in direzione x . Grazie alle molle di rigidezza elastica k_2 , il moto di drive delle masse interne è trasferito a quelle più esterne, dette di Coriolis perché si potranno muovere sia in direzione x che y rispettivamente grazie a driving e forza di Coriolis. Grazie alle molle di rigidezza elastica k_3 , il loro solo moto verticale è trasferito alle piccole masse laterali (di sense), che, grazie alle opportune molle, sono impossibilitate a muoversi lungo x , moto che potrebbe produrre errori in presenza di molle imperfette. Così si avrà idealmente un totale disaccoppiamento tra i modi di sense e drive. Grazie al fatto che le masse di sense si muovono di solo moto verticale, ed è il loro moto ad essere rivelato dal sistema di sensing, il problema della generazione di un moto lungo y a causa di imperfezioni delle molle è meglio risolto.

Specifiche del progetto

Il progetto a cui si è lavorato ha avuto delle specifiche di gran lunga più spinte delle caratteristiche finora richieste e perseguite in giroscopi MEMS. Di seguito, i principali parametri descrittivi del corretto funzionamento del giroscopio e una tabella di confronto tra specifiche attuali e stato dell'arte:

- Measurement range (full scale): il range di valori di velocità angolare che si desidera rivelare con il dispositivo prima che intervengano fenomeni indesiderati come cattivo funzionamento del dispositivo, non linearità della risposta, saturazione dell'ADC a valle,...;
- Sensitivity: come verrà spiegato in seguito, l'effetto che una velocità angolare produce sul giroscopio è, in ultima istanza, uno stress (cioè una forza per unità di area) su un elemento

submicrometrico; si definisce sensitività come il trasferimento operato dall'intero sistema della velocità angolare in stress. Si misura in Pa/s .

- Sensitivity change vs. temperature over operating temperature range: fissato il range di temperature in cui si richiede che il dispositivo funzioni, è il valore massimo di variazioni percentuali che la sensitività può subire all'interno di questo range;
- Bandwidth: la banda massima che la velocità angolare da misurare può avere per essere correttamente letta dal dispositivo senza eccessive attenuazioni (di solito la banda corrisponde ad un'attenuazione di $\sqrt{2}$ del segnale);
- Zero rate level: la velocità angolare massima che il dispositivo, per diverse ragioni come rumore, errore di quadratura,..., sembra rivelare secondo il suo corretto funzionamento in assenza di rotazioni, quando idealmente si vorrebbe un'uscita nulla;
- Zero rate level over temperature: la variazione di Zero rate level al variare della temperatura;
- Non linearity: la deviazione massima della caratteristica reale dalla ideale, che è lineare; si misura in percentuale del full scale;
- Power consumption: il consumo massimo di potenza che si richiede al dispositivo, alimentato con una data tensione di core;
- Rate noise density: la massima densità spettrale di rumore (sotto radice) riportato all'ingresso tollerabile; moltiplicato per la banda del dispositivo dà il fondo di rumore di velocità angolare del dispositivo, o minima velocità angolare rivelabile;
- Operating temperature range: il range di temperatura in cui si richiede che il dispositivo abbia un buon funzionamento;
- Package dimensions: dimensioni massime del package, che contiene ed isola il giroscopio MEMS;
- Shock resistance: la massima pendenza della rampa di accelerazione che il dispositivo può tollerare senza mal funzionamenti;

Parametro del giroscopio	Unità	Stato dell'arte	Target
Measurement range (full scale)	$^{\circ}/s$	± 2000	± 2000
Max. Sensitivity	$Pa / ^{\circ}/s$		50000
Sensitivity change vs. temperature over operating temperature range	%	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$
Bandwidth	Hz		400
Zero rate level	$^{\circ}/s$	± 75	± 75
Zero rate level over temperature	$^{\circ}/s/^{\circ}C$	0.04	0.04
Non linearity	%FS	± 0.2	± 0.2
Power consumption	<i>mW</i>	18 (3V)	4 (2.4V)
Rate noise density	$^{\circ}/s/\sqrt{Hz}$	0.03	0.015
Operating temperature range	$^{\circ}C$	-40/85	-40/85
Package dimensions	<i>mm x mm</i>	$4 \times 4 \times 1$	$2 \times 2 \times 1$
Shock resistance	g/ms		100000

Tabella 2.1: specifiche del progetto.

Lettura con nanogauge

Il principale fattore che il progetto Nirvana si propone di sfruttare per andare oltre lo stato dell'arte è stata una nuova modalità di lettura, che si avvale della proprietà di piezoresistività del nanogauge [13-14]. Esso è un elemento di silicio di dimensioni notevolmente ridotte: grazie ad opportuni accorgimenti tecnologici, è possibile produrre un nanogauge lungo $5\ \mu m$ e alto e largo solo $250\ nm$. In figura 2.4, il nanogauge che è stato simulato per meglio tener conto degli errori di processo e una fotografia SEM di un nanogauge. Esso è costituito di silicio monocristallino, materiale che in dimensioni submicrometriche- in particolare su sezioni di poche centinaia di nanometri- presenta un comportamento piezoresistivo. Quando alla superficie Σ è applicata una forza \vec{F} , cioè il nanogauge subisce uno stress $\sigma = F/\Sigma$, allora ad uno stress corrisponde proporzionalmente una variazione relativa della lunghezza secondo la relazione: $\sigma = E \Delta L/L$, dove E è detto modulo di Young [15]; il suo valore nel processo è $E = 169\ GPa$. La resistenza subirà anch'essa una variazione relativa, proporzionale a $\Delta L/L$ attraverso il gauge factor (GF): $\Delta R/R = GF \Delta L/L$. Un suo valore tipico è $GF = 45$, per questa tecnologia e per le dimensioni sopra dette. In definitiva, si avrà una variazione di resistenza proporzionale allo stress applicato: $\Delta R/R = \frac{GF}{E} \sigma$.

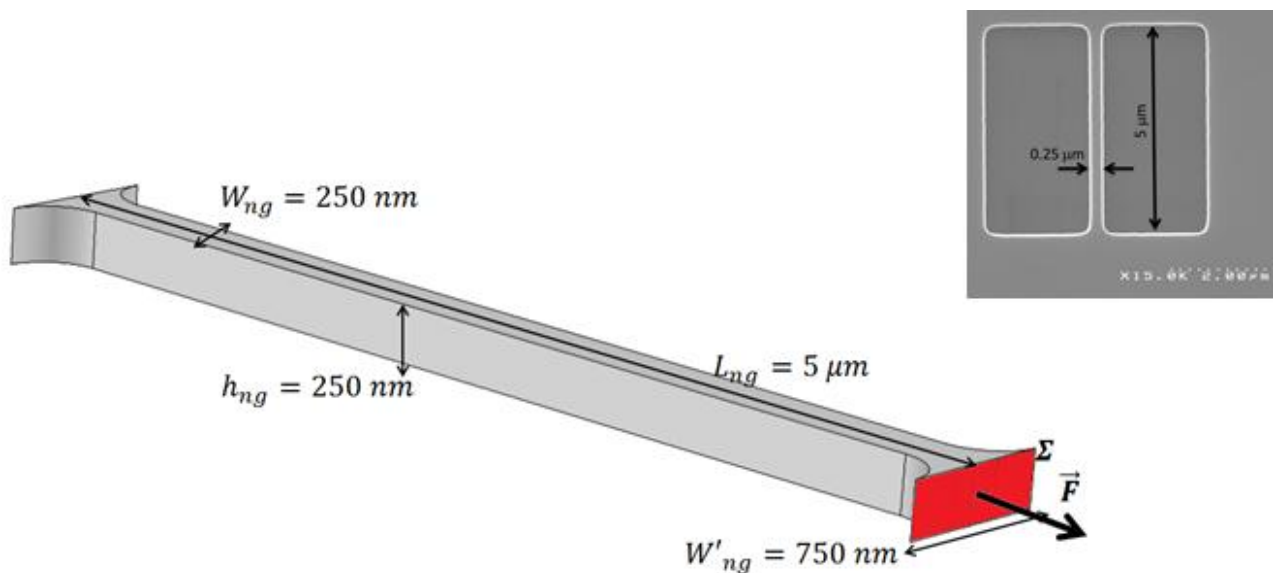


Figura 2.4: nanogauge simulato su Comsol 4.0 (a sinistra) e fotografia SEM di un nanogauge (a destra)

In questo modo basterà rilevare le variazioni di resistenza del nanogauge per ottenere indirettamente il valore dello stress applicato, che, grazie al progetto di un'opportuna geometria, sarà dovuto alla forza di Coriolis sentita da una massa messa precedentemente in moto.

Il problema che si è posto è stato relativo alla modalità con cui un moto in direzione y , considerato un z -gyro, possa essere sorgente di stress sul nanogauge. La soluzione che si è deciso di adottare è stata una geometria con tuning fork a due frames con trasferimento del moto verticale del frame di Coriolis (cioè il frame libero di muoversi anche in direzione y) al nanogauge tramite un' opportuna leva [16]. In figura 2.5, un esempio di z -gyro progettato con tale geometria. Come verrà spiegato meglio in seguito, questo sistema presenta più modi di risonanza, di cui quelli interessanti per il funzionamento riguardano il moto in antifase delle due masse connesse tra loro dal tuning fork in direzione x , e il moto in antifase delle due masse blu, che è eccitato in presenza di rotazioni. Sono da scartarsi soluzioni che vedano il nanogauge direttamente connesso alle masse di Coriolis: in questo modo, infatti, le si connetterebbe a un oggetto molto rigido (il nanogauge) che, in parallelo alle altre molle, dominerebbe con la sua elevata rigidità, generando dei valori di frequenza di risonanza di senso incompatibili con quella di drive, che, per ragioni che si spiegheranno dopo, è richiesto che sia vicina in valore.

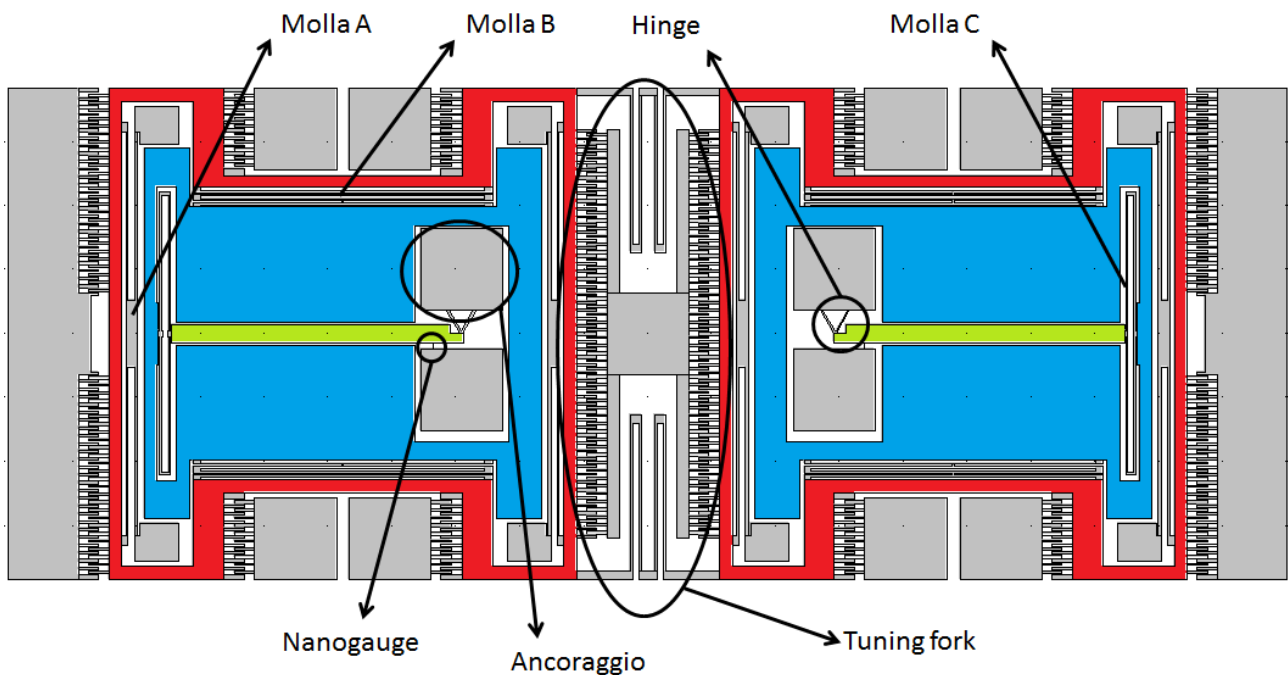


Figura 2.5: z -gyro con tuning fork, due frames e lettura tramite leva e nanogauge.

Le masse esterne sono quelle direttamente attuate dal sistema di drive, costituito dai comb fingers laterali. Esse sono connesse ad ancoraggi tramite le molle A (due per ogni massa) che consentono solo il moto in direzione x . Grazie alle molle B, il moto orizzontale è completamente trasferito alle

masse blu, che, grazie alla geometria di suddette molle, possono muoversi in direzione y a seguito di un'eventuale rotazione (o indesiderate accelerazioni esterne). La leva (verde) ha un estremo vincolato grazie ad un sistema di hinge ed ancoraggio. L'hinge è una struttura che le tecnologie di processo permettono di ottenere ed ha il ruolo di fulcro della leva. La massa blu muovendosi in verticale esercita una forza sulla leva attraverso la molla C, che comunque la lascia libera di muoversi in direzione x. La leva, così, vedrà una rotazione attorno all'asse z passante per il fulcro. Così, attraverso la leva, una forza verrà esercitata sul nanogauge. Muovendosi le masse blu in antifase, in presenza di rotazioni, nello stesso istante un nanogauge sarà compresso, mentre l'altro sarà tirato; sarà compito dell'elettronica successiva combinare opportunamente i segnali provenienti dai due nanogauges per rigettare accelerazioni verticali di modo comune e raddoppiare il segnale dato dal singolo nanogauge.

Il fattore Γ

Il fattore Γ è il rapporto tra lo spostamento della testa della leva, connessa alla massa di Coriolis attraverso la molla C, e il conseguente spostamento della testa del nanogauge. Esso, quindi, esprime l'entità del trasferimento dello spostamento della massa di sense attraverso la molla C e la leva ed è, quindi, un parametro adimensionale che descrive la bontà del sistema molla C-leva-nanogauge; è in base ad esso che si è pensato di ottimizzare tale sistema, sia per z-gyro che per xy-gyro.

Ottimizzazione del sistema leva-nanogauge: z-gyro

Il funzionamento del sistema leva-nanogauge in un z-gyro, di cui un esempio è quello sopra trattato (ma questa trattazione vale per ogni z-gyro descritto in questa tesi), vede l'applicazione di una forza di compressione o di tensione al nanogauge da parte della massa di Coriolis attraverso la leva. In generale, se una forza \vec{F}_1 agisce sulla leva a una distanza b_1 dal fulcro, detta braccio, allora sul nanogauge, che si trova a distanza b_2 dal fulcro, agirà una forza $\vec{F}_2 = b_1/b_2 \vec{F}_1$: la forza originaria è stata magnificata del rapporto tra i bracci.



Figura 2.6: bracci della leva e forze agenti sulla testa della leva e sulla testa del nanogauge.

Dalla formula, sarebbe desiderabile avere un braccio b_2 più piccolo possibile, ma in realtà se esso viene ridotto eccessivamente, il nanogauge, essendo sempre più vicino al fulcro, si sposterà sempre di meno ed il beneficio sarà assente. Esisterà, così, un punto ottimo di lavoro, che si è cercato muovendosi secondo i due gradi di libertà che il sistema offre: lunghezza del primo braccio e lunghezza del secondo braccio, con il vincolo delle dimensioni massime che può avere l'intero giroscopio.

Lo stress che il nanogauge sente e che determina un cambio di resistenza è compressile o tensile. In figura 2.7, l'effetto simulato (enfattizzato di un opportuno fattore che lo renda sufficientemente visibile) sul nanogauge di una compressione o tensione. Da una parte, il nanogauge compresso, per via dell'applicazione di una forza come \vec{F}_1 , dall'altra il nanogauge opposto, che sentirà l'effetto di una forza opposta a \vec{F}_1 . L'altra estremità del nanogauge, nella simulazione così come nella realtà, è connessa ad un ancoraggio, ma quest'ultimo qui è stato rimosso per rendere la seguente figura più comprensibile.

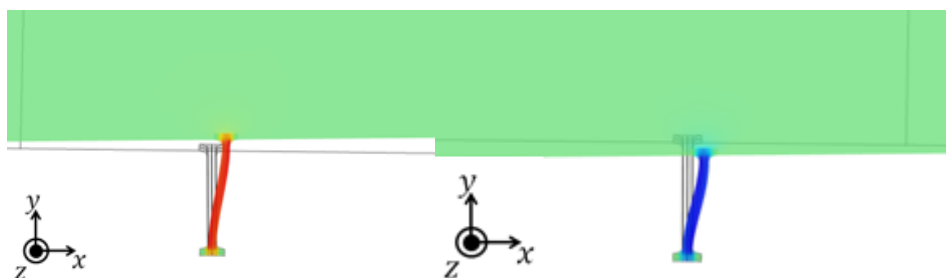


Figura 2.7: nanogauge tirato (a sinistra) e compresso (a destra).

Anche qui valgono i discorsi sull'ottimizzazione fatti prima, ma mentre il z-gyro è ottimizzabile, qui invece il secondo braccio non è modificabile a piacere in lunghezza. Infatti il fulcro si trova necessariamente a metà dell'altezza del processo (che, nel nostro caso, è $h = 15 \mu m$), e così, per come è fabbricato il nanogauge, esso si troverà a distanza $b_2 = 7.5 \mu m$ dal fulcro, come si può osservare in figura 2.9. Dai risultati delle simulazioni è emersa l'impossibilità della realizzazione di

una geometria ottima attraverso la sola modifica del braccio b_1 : questa comporterebbe delle frequenze di risonanza eccessivamente elevate.

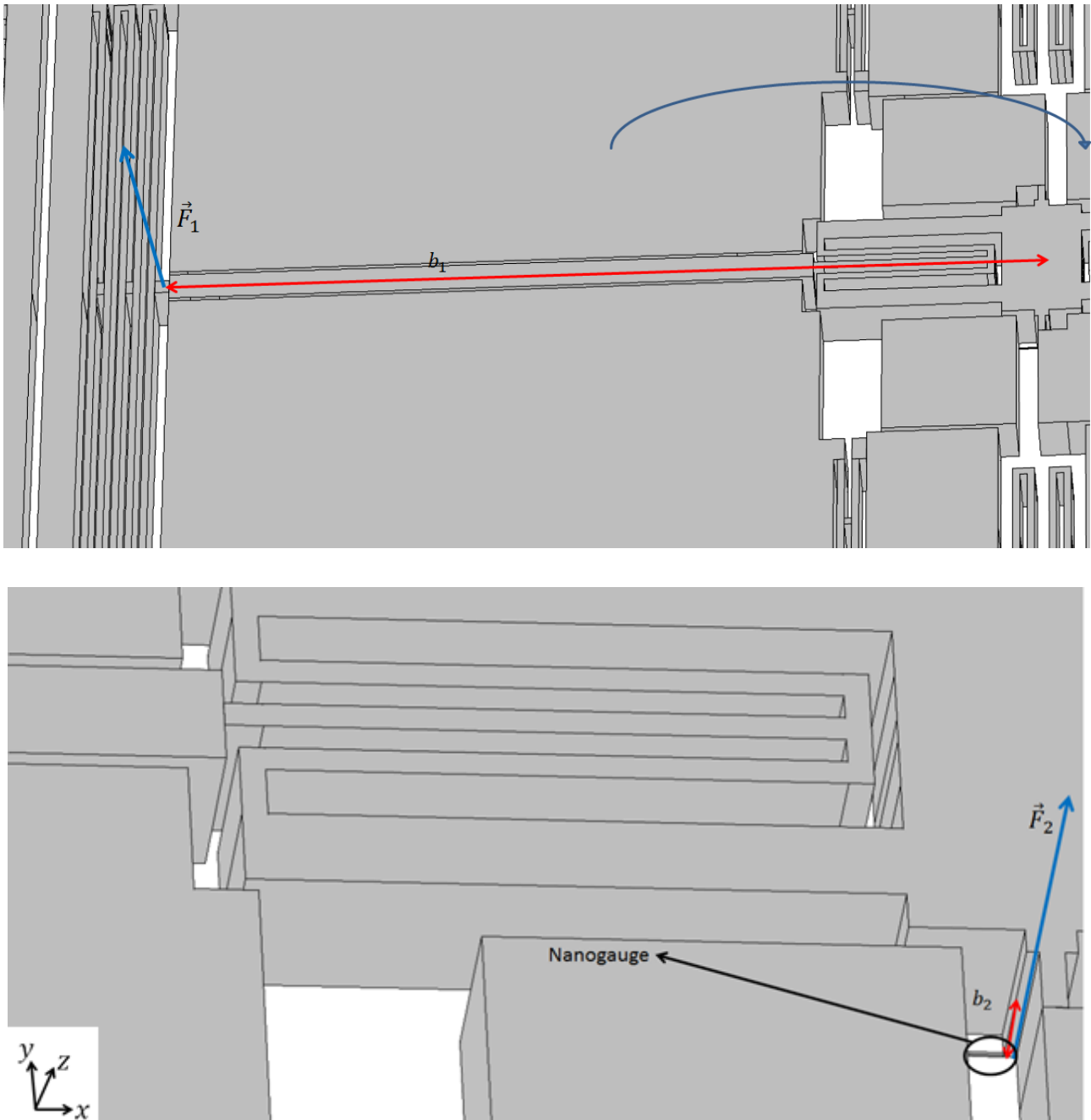


Figura 2.9: bracci della leva e forze agenti sulla testa della leva e sulla testa del nanogauge.

Questa volta lo stress sul nanogauge è di tipo torsionale. In figura 2.10, la torsione simulata di un nanogauge, enfatizzata di un opportuno fattore perché sia ben visibile. Da una parte, la torsione che subisce il nanogauge considerato nella figura 2.9, dall'altra, la torsione (opposta) che subisce l'altro nanogauge, in presenza di una forza come \vec{F}_1 da una parte e della sua opposta dall'altra. Anche qui,

l'altra estremità del nanogauge nella realtà così come nella simulazione è connessa ad un ancoraggio, ma questo è stato rimosso perché l'immagine sia più comprensibile.

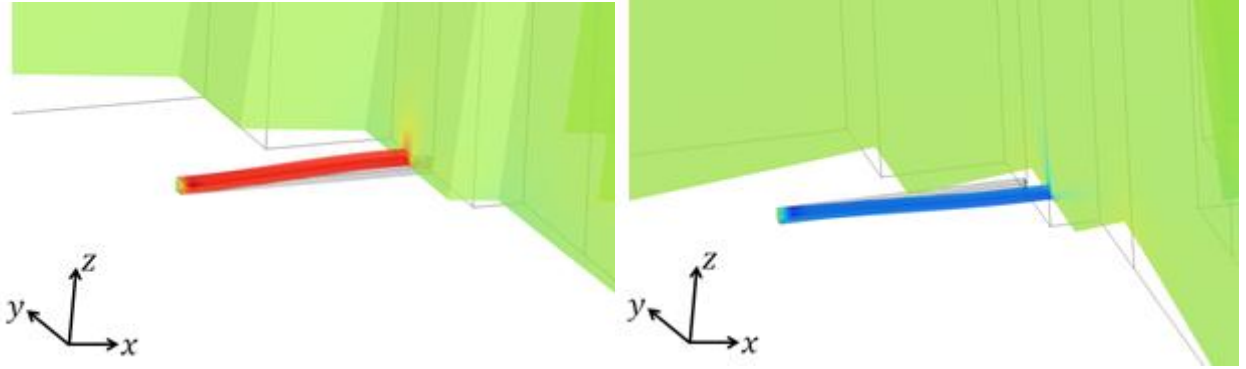


Figura 2.10: la coppia di nanogauges, uno torto in un modo e l'altro nel modo opposto

Sensitività

Definiamo ora la sensitività come quel parametro che descrive come la velocità angolare si trasferisce complessivamente al nanogauge sotto forma di stress; si misurerà, dunque, in $\text{Pa}/\text{°}/\text{s}$.

Come è stato detto precedentemente, per l'attuazione si è valutato conveniente l'utilizzo di comb fingers; questo comporta una forza di drive

$$F_D = \frac{2\varepsilon_0 h N_{cell} V_b v_a(t)}{g}$$

Dove ε_0 è la costante dielettrica del vuoto, h l'altezza del processo, N_{cell} il numero di celle di comb fingers, V_b e $v_a(t)$ le tensioni in continua e in alternata usate per polarizzare il sistema di attuazione (come già descritto nel Capitolo 1), g il gap dei comb fingers. Tutto il sistema avrà una frequenza di risonanza di drive che vede le due metà muoversi in antifase. La scelta migliore è di avere una tensione tempo variante $v_a(t) = v_{a,0} \sin(2\pi f_D t)$; in questo modo, infatti, lo spostamento delle masse sarà massimizzato e pari a

$$(11) \quad x_D(t) = \frac{Q_D}{k_D} F_D = \frac{Q_D}{k_D} \frac{2\varepsilon_0 h N_{cell} V_b v_a(t)}{g} = x_D \sin(2\pi f_D t)$$

Dove Q_D è il fattore di qualità del sistema di drive e k_D la rigidità elastica ad esso associata. Come si è visto, in presenza di una velocità angolare ω_a , supposta per ora stazionaria, si produrrà

sulle masse di Coriolis (di massa m_s) una forza di Coriolis ortogonale a velocità di drive ($v_D(t) = \frac{dx_D(t)}{dt} = 2\pi f_D x_D \cos(2\pi f_D t)$) e velocità angolare ed in modulo pari a

$$F_C = 2m_s \omega_a v_D(t)$$

Per ora assumiamo di aver progettato il sistema per avere lo stesso valore per le frequenze di risonanza di drive e sense, così che, in presenza di una velocità angolare costante nel tempo, cioè a 0Hz, lo spostamento in direzione di sense (che ora assumiamo sia in direzione y) è massimo e pari a

$$(12) \quad y_C = \frac{Q_S}{k_s} F_C = \frac{Q_S}{k_s} 2m_s \omega_a v_D(t) = \frac{Q_S}{k_s} 2m_s \omega_a 2\pi f_D \frac{Q_D}{k_D} \frac{2\varepsilon_0 h N_{cell} V_b v_{a,0}}{g} \cos(2\pi f_D t)$$

Dove Q_S è il fattore di qualità del sistema di sense, e k_s la sua rigidezza elastica. Attraverso il fattore Γ passiamo allo spostamento che sente il nanogauge

$$y_{ng} = \Gamma y_C$$

Infine, lo stress sul nanogauge (di lunghezza L) sarà, secondo la relazione costitutiva del nanogauge,

$$(13) \quad \sigma(t) = E \frac{y_{ng}}{L} = \frac{E}{L} \Gamma \frac{Q_S}{k_s} 2m_s \omega_a 2\pi f_D \frac{Q_D}{k_D} \frac{2\varepsilon_0 h N_{cell} V_b v_{a,0}}{g} \cos(2\pi f_D t)$$

La sensitività sarà

$$(14) \quad S \left[\frac{Pa}{\omega_a} \right] = \frac{\sigma_{peak}}{\omega_a} = \frac{E}{L} \Gamma \frac{Q_S}{k_s} 2m_s 2\pi f_D \frac{Q_D}{k_D} \frac{2\varepsilon_0 h N_{cell} V_b v_{a,0}}{g} \frac{2\pi}{360}$$

Espressa, poi, in variazione relativa di resistenza per grado al secondo, la sensitività risulta essere

$$(15) \quad S \left[\frac{\Delta R/R}{\omega_a} \right] = \frac{E}{L} \Gamma \frac{Q_S}{k_s} 2m_s 2\pi f_D \frac{Q_D}{k_D} \frac{2\varepsilon_0 h N_{cell} V_b v_{a,0}}{g} \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{GF}{E}$$

Come era desiderabile, si nota la relazione di linearità tra grandezza da misurare e stress sul nanogauge. Come verrà descritto in seguito, la prima elettronica di lettura del segnale è anch'essa progettata per mantenere tale relazione di proporzionalità.

Ponte di Wheatstone

Come si è detto in precedenza, i due nanogauge, per via del moto di drive in antifase delle due masse, che comporta un moto in antifase delle masse di Coriolis, genereranno variazioni di resistenza uguali in modulo ma opposte di segno. Il ponte di Wheatstone, in figura 2.11, è una semplice soluzione elettronica che permette di ottenere dal giroscopio un unico valore di tensione, V_{out} , proporzionale alla grandezza fisica da misurare, dato dal contributo di entrambi i nanogauge, e immune da accelerazioni di modo comune, che vengono rigettate.

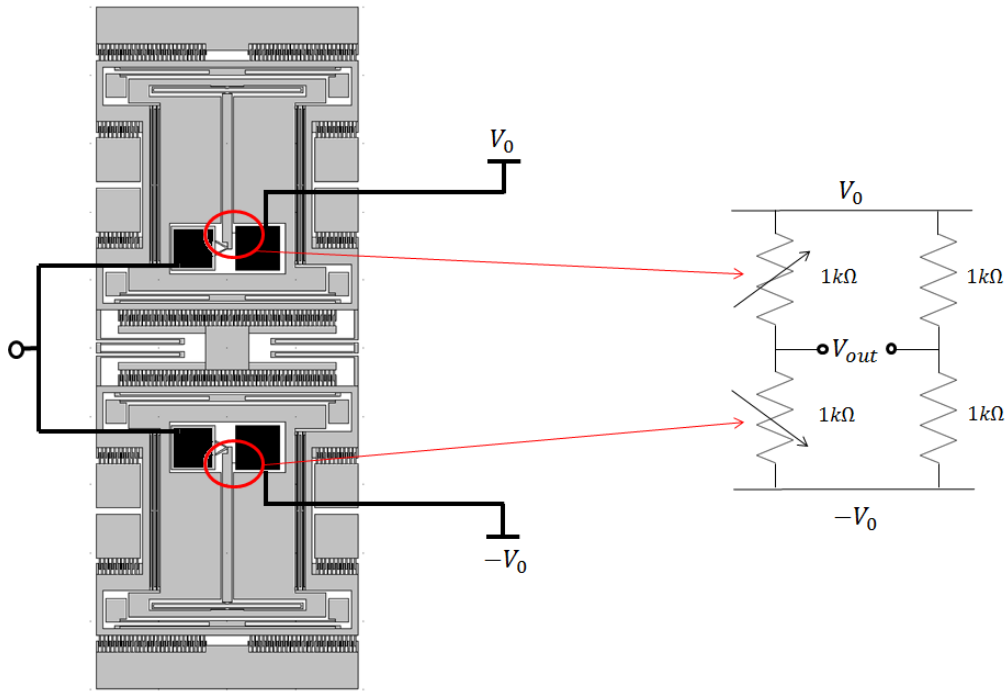


Figura 2.11: ponte di Wheatstone, opportunamente polarizzato.

La resistenza R a riposo dei nanogauge è del valore di $1k\Omega$, per questo di $1k\Omega$ sono le due resistenze del secondo ramo del ponte. Queste ultime vengono implementate con due nanogauges, per avere nei quattro elementi resistivi lo stesso comportamento al variare della temperatura. In assenza di segnale si avrà $V_{out} = 0V$ perché a $0V$ si trovano entrambi i punti medi dei partitori. In presenza di un segnale differenziale, i due nanogauge vedono una variazione di resistenza $+\Delta R$ quello superiore, e $-\Delta R$ quello inferiore, per esempio. Il modulo di ΔR è tale che $\Delta R = GF \frac{\Delta L}{L} R$. Perciò ora si avrà

$$(16) \quad V_{out} = V_0 \frac{R - \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} - V_0 \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} = -V_0 \frac{2\Delta R}{2R} = -V_0 \frac{\Delta R}{R}$$

Si avrà la stessa uscita ma di segno cambiato se, al contrario, il nanogauge inferiore vede un incremento della sua resistenza $+\Delta R$ e quello superiore un decremento, $-\Delta R$.

Come si era visto, $\frac{\Delta R}{R} \propto \omega_a$; quindi si avrà $V_{out} \propto \omega_a$.

Consideriamo ora il caso in cui ci sia un'accelerazione di modo comune nella direzione di sense: questa produrrà in entrambi i nanogauge una variazione di resistenza uguale in modulo e segno; ipotizzando per entrambi un incremento della resistenza, si avrà

$$V_{out} = V_0 \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R + \Delta R} - V_0 \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R + \Delta R} = 0V.$$

Come si desiderava, il sistema “sottrae” i segnali generati dai due nanogauge, ottenendo così un'uscita doppia nel caso di segnale differenziale in ingresso, ovvero sia di moto in antifase delle masse di Coriolis, ovvero sia nel caso di rotazione del sistema, e, contemporaneamente, ottenendo una reiezione dei modi comuni, che affliggono singolarmente entrambi i nanogauge ma che lasciano inalterata l'uscita.

Mismatch dei modi: banda del giroscopio e nuova sensibilità

Come è stato trattato precedentemente, con un'opportuna progettazione del sistema, il trasferimento di una velocità angolare a $0Hz$ è il massimo ottenibile da una serie di due sistemi massa-molla smorzati, quali sono quelli di drive e sense; infatti la forza di drive sinusoidale è a $f = f_D$, ed è, quindi, trasferita in spostamento di drive con il fattore di qualità Q_D e, infine, si avrà una forza di Coriolis sinusoidale a $f = f_D = f_S$ (nel caso in cui i modi di sense e drive vengano fatti coincidere), trasferita, quindi, anch'essa, in spostamento in direzione di sense con fattore di qualità Q_S .

Nel caso, però, che la velocità angolare sia genericamente costituita da una somma di armoniche il trasferimento delle varie frequenze è tanto più basso quanto più queste sono lontane dalla continua. Detta f la frequenza della velocità angolare in ingresso al sistema, ω_a , essendo che $\sin(\alpha)\sin(\beta) \propto \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$, si avrà una forza di Coriolis (che ricordiamo essere $F_C \propto \omega_a v_D$) a due frequenze, $f_D - f_{IN}$ e $f_D + f_{IN}$, che sarà trasferita in spostamento nella direzione di sense secondo la solita funzione di trasferimento (da forza a spostamento) del sistema di sense, rappresentata in figura 2.12.

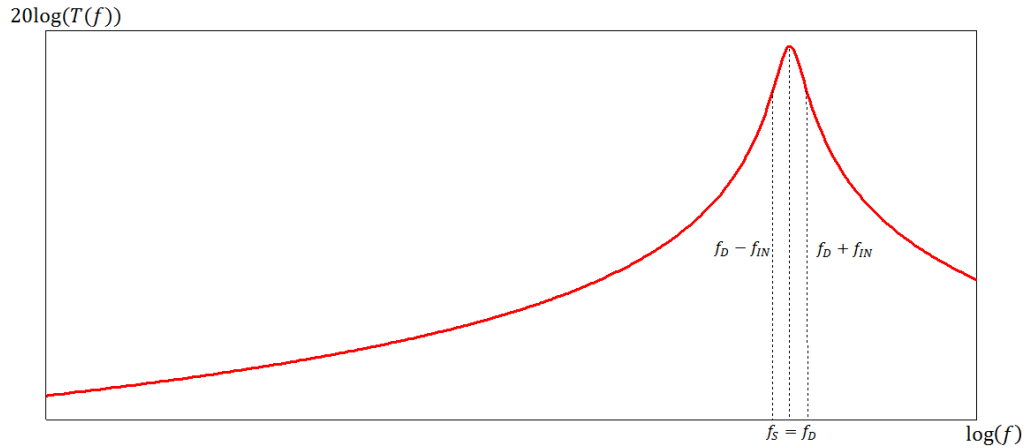


Figura 2.12: funzione di trasferimento del sistema di sense, con $f_s = f_d$.

La funzione di trasferimento di sense è

$$T(f) = \left| \frac{X(j2\pi f)}{F(j2\pi f)} \right| = \frac{1}{k_s} \frac{1}{\sqrt{\left(\left(1 - \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right) \right)^2 + \left(\frac{f}{f_s} \frac{1}{Q_s} \right)^2}}$$

Correttamente, $T(f = f_s) = \frac{1}{k_s} Q_s$; ma in generale chiamiamo fattore di qualità efficace il secondo termine della funzione di trasferimento, che varia con la frequenza:

$$(17) \quad Q_{s,eff}(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(\left(1 - \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 \right) \right)^2 + \left(\frac{f}{f_s} \frac{1}{Q_s} \right)^2}}$$

La banda del giroscopio, ovverossia l'insieme di frequenze che vedono all'incirca lo stesso trasferimento (con al massimo un fattore 2 di differenza), è $B = f_s / 2Q_s \cong 20KHz / 2 \cdot 1000 = 10Hz$: essa è decisamente inferiore alla banda di centinaia di Hz richiesta dalle specifiche. La soluzione che è stata adottata per questo problema è stata di differenziare i modi di drive e sense di qualche centinaio di Hz (tipicamente). Si è progettato il sistema per avere una frequenza di drive inferiore a quella di sense, come rappresentato in figura 2.13.

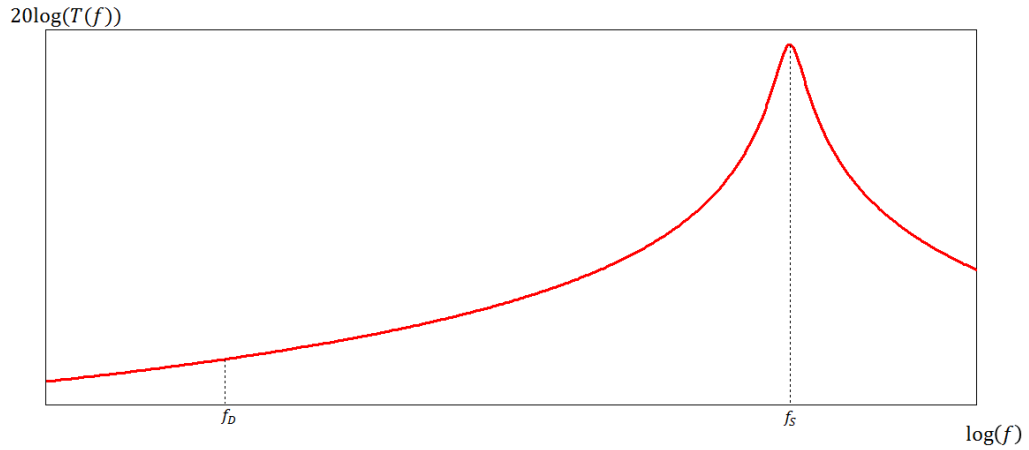


Figura 2.13: funzione di trasferimento del sistema di sense, con $f_s > f_d$.

Come si può osservare in figura 1.14, il prodotto tra velocità di drive e velocità angolare genera due armoniche a frequenza $f_d - f_{IN}$ e $f_d + f_{IN}$: queste, in ingresso al sistema di sense, saranno trasferite (da forza di Coriolis a spostamento in direzione di sense) diversamente, a seconda della loro frequenza.

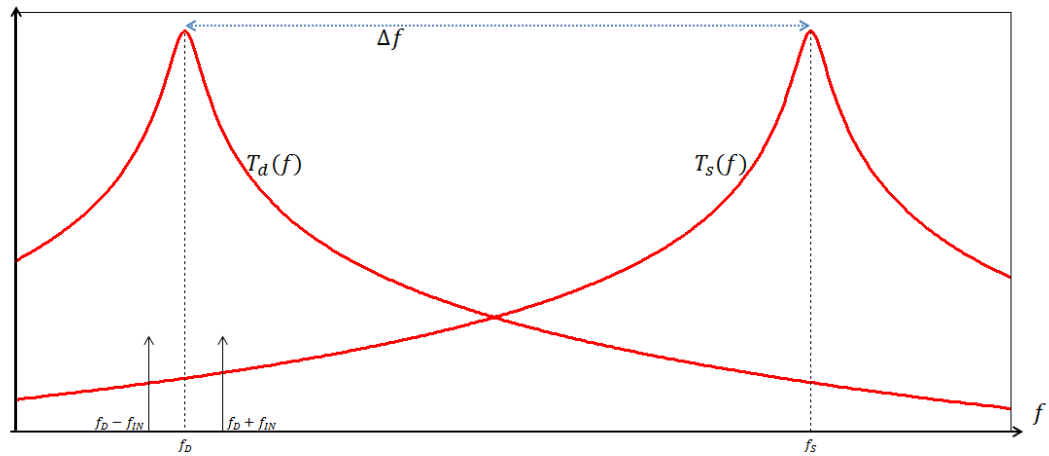


Figura 2.14: funzioni di trasferimento dei sistemi di drive e sense, e le due armoniche che compongono la forza di Coriolis.

La figura 2.15 mostra come sono trasferite le diverse frequenze della velocità angolare in ingresso al sistema: essa rappresenta, in presenza di diversi mismatch tra f_D ed f_S , l'andamento di

$$(18) \quad T'(f) = \frac{1}{k_s} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_d + f}{f_s}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{f_d + f}{f_s} \frac{1}{Q_s}\right)^2}}$$

Stiamo ora considerando solo l'armonica della forza di Coriolis data dalla somma di frequenza di drive e frequenza in ingresso.

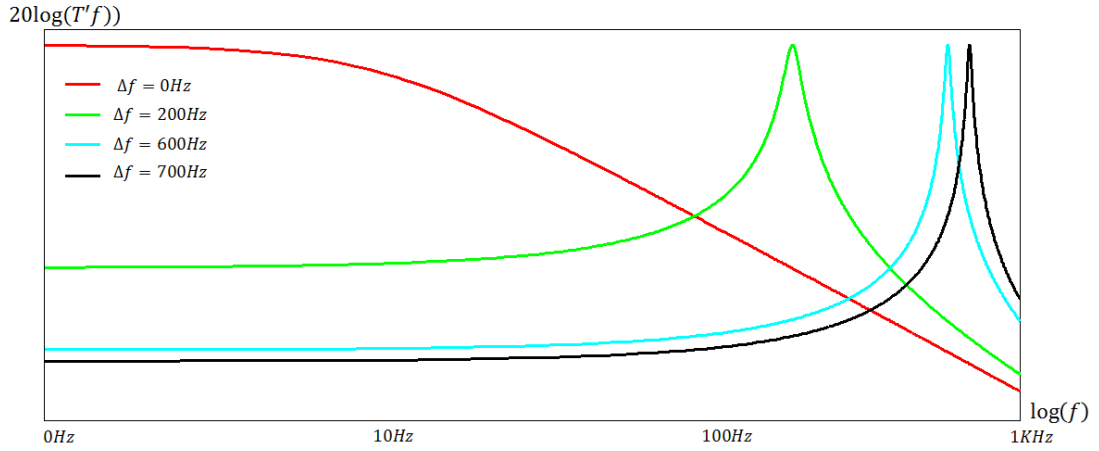


Figura 2.15: andamento di $T'(f)$ al variare del mismatch tra i modi.

La figura 2.16 descrive il trasferimento della seconda armonica della forza di Coriolis, a frequenza pari alla differenza tra frequenza di drive e frequenza in ingresso. La funzione di trasferimento è

$$(19) \quad T''(f) = \frac{1}{k_s} \frac{1}{\sqrt{\left(\left(1 - \left(\frac{f_d - f}{f_s} \right)^2 \right)^2 + \left(\frac{f_d - f}{f_s Q_s} \right)^2 \right)}}$$

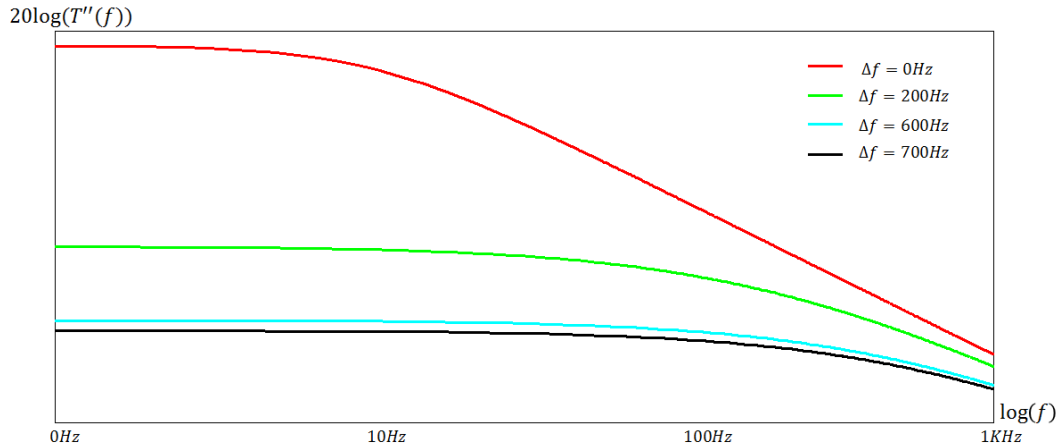


Figura 2.16: andamento di $T''(f)$ al variare del mismatch tra i modi.

Si nota come, al crescere del mismatch, ci sia un intervallo sempre più grande di frequenze che sono trasferite tutte circa con lo stesso fattore, trattate sostanzialmente nello stesso modo: il dispositivo è ora dotato di una banda- approssimabile con $\Delta f = (f_s - f_D)$ - adeguata alle specifiche. Si sottolinea

come i picchi delle diverse funzioni $T'(f)$ siano in corrispondenza della differenza tra i modi di sense e drive: infatti la forza di Coriolis avrà un'armonica data dalla somma a frequenza pari a f_s : $f = f_D + \Delta f = f_D + (f_s - f_D) = f_s$. Dopo il picco la funzione di trasferimento tende a zero perché tende a zero la funzione di trasferimento di sense al crescere della frequenza, per frequenze superiori a quella di risonanza.

La nuova sensitività sarà, di conseguenza, (supposta una velocità angolare a 0Hz)

$$(20) \quad S \left[\frac{Pa}{^\circ/s} \right] = \frac{\sigma_{peak}}{\omega_a} = \frac{\frac{E}{L} \Gamma \frac{1}{k_s} 2m_c 2\pi f_D \frac{Q_D}{k_D} \frac{2\varepsilon_0 h N_{cell} V_b v_{a,0}}{g} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_D}{f_s}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{f_D}{f_s Q_s}\right)^2}} \frac{2\pi}{360}}$$

Essa dipende, quindi, da diversi parametri:

- Il fattore di spostamento Γ : nel progettare il dispositivo un obiettivo è stata la sua massimizzazione;
- Il fattore di smorzamento b_D , contenuto nel fattore di qualità $Q_D (= \frac{\sqrt{k_D m_D}}{b_D})$: per aumentare la sensitività è opportuno lavorare a basse pressioni, così da ridurre tale fattore;
- La forza di drive, e quindi tutti i parametri elettrici e geometrici che la costituiscono, in particolare l'altezza del processo, il numero di celle, la tensione continua e quella tempo variante;
- La frequenza di risonanza di sense: si ha che $S \propto \frac{k_s}{m_c} = \frac{1}{\omega_s^2}$; per aumentare la sensitività sarebbe opportuno diminuire la frequenza di risonanza, ma è opportuno tenerla al più attorno ai 20 kHz, cioè a frequenze superiori a quelle acustiche, che altrimenti eserciterebbero un forte disturbo sul dispositivo;

Il mismatch tra modi di drive e sense: nell'ipotesi ragionevole che $\frac{\omega_s}{2Q_s} < \Delta\omega < \omega_s$, la sensitività si dimostra essere $S \propto 1/\Delta\omega$: al crescere del mismatch cresce la banda del giroscopio, ma diminuisce il suo guadagno. In particolare, si può dimostrare che, detto Δy_s lo spostamento della massa di sense, allora si ha:

$$(21) \quad \Delta y_s = \frac{\Omega}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{b_D} \cdot \frac{F_D}{f_s \Delta f}$$

Sorgenti dello smorzamento

Come si è già accennato, considerata una massa in moto in un fluido, il fenomeno dello smorzamento consiste in una dissipazione della sua energia cinetica che si può modellizzare come l'applicazione a tale massa di una forza opposta al suo moto e proporzionale alla sua velocità attraverso il fattore di smorzamento b . Lo smorzamento può essere di tipo termoelastico oppure essere legato al fluido in cui la massa si muove. Quest'ultimo, nelle condizioni tipiche di pressione ottenibili nel processo di ST e Leti ($P \approx 1\text{mbar}$), risulta essere sempre dominante, e a sua volta può essere di tipo couette o di tipo squeeze-film: il primo si verifica quando una superficie ha un moto di scorrimento rispetto ad un'altra superficie, separata dalla prima da un fluido di viscosità μ , come in figura 2.20; il secondo si manifesta quando una superficie si avvicina o si allontana da un'altra, sempre muovendosi in un fluido di viscosità μ , come descritto in figura 2.20. La viscosità (spesso detta dinamica) μ è una grandezza fisica che quantifica la resistenza dei fluidi allo scorrimento, quindi la coesione interna del fluido: fluidi ad alta viscosità tenderanno, quindi, a frenare maggiormente il moto della massa. Un esempio verosimile nel nostro caso sarà

$$\mu = \mu_{aria}(@P = 1\text{atm}) = 1.79 \cdot 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

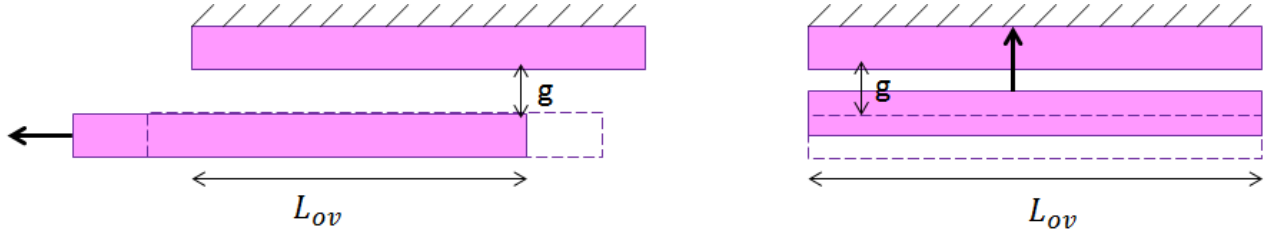


Figura 2.17: rappresentazione schematica di moti relativi di due masse che vedono couette damping (a sinistra) e squeeze film damping (destra).

Si dimostra che il fattore di smorzamento b_{cou} dovuto allo smorzamento couette, considerate due superfici con altezza di processo h , affacciamento a riposo L_{ov} e distanti g , è $b_{cou} = \frac{\mu_{aria} h L_{ov}}{g}$. Questo smorzamento si ha in presenza di un'attuazione delle masse del giroscopio attraverso comb-fingers; allora, con un numero di celle pari a N_{cell} si avrà:

$$(22) \quad b_{cou} = 2N_{cell} \frac{\mu_{aria} h L_{ov}}{g}$$

Sostituendo valori tipici, come $h = 15\mu m$, $L_{ov} = 8\mu m$, $g = 1.1\mu m$, $N_{cell} = 130$, si ottiene $b_{cou} = 5.07 \cdot 10^{-7} \text{Ns/m}$.

Considerate le stesse superfici, il fattore di smorzamento di tipo squeeze-film si dimostra essere

$$(23) \quad b_{sq-f} = K \frac{\mu_{aria} L_{ov} h^3}{g^3}$$

Dove $K = 1$ per $h \ll L_{ov}$; $K = 0.42$ per $h \approx L_{ov}$. Nel nostro caso è opportuno scegliere $K = 1$. Sostituendo i valori tipici, si ottiene $b_{sq-f} = 3.61 \cdot 10^{-7} \text{Ns/m}$.

Consideriamo il giroscopio in figura 2.21;

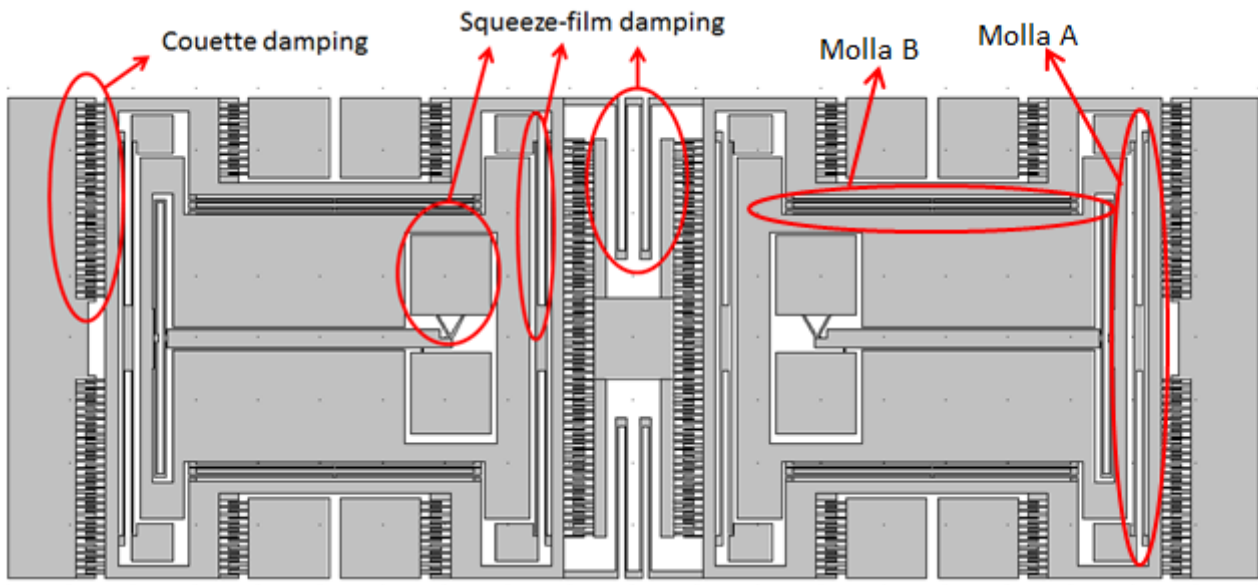


Figura 2.18:z-gyro con evidenziati degli esempi di smorzamento.

Volendo calcolare lo smorzamento che ciascuna delle due masse del giroscopio sente quando è attuata, bisognerà tener conto di:

- Couette damping dovuto ai comb fingers: si avrà ottiene $b_{cou} = 5.07 \cdot 10^{-7} \text{Ns/m}$ (calcolato prima);
- Squeeze-film damping dovuto alle molle di drive (molle A e fork): in generale una molla A ha N folds, un'estremità connessa alla massa mobile e l'altra connessa ad un ancoraggio; la prima estremità si muoverà come la massa mobile, la seconda estremità rimarrà ferma, e i punti di ripiegamento intermedi si muovono in ragione della loro vicinanza ad una o all'altra estremità: in generale il punto i -esimo si muove di $\frac{x_D}{N+1} \cdot i$, se il punto $i = 0$ è il punto che sta fermo perché ancorato. Così nel caso della molla A in figura 2.22, i due bracci derivanti dal

ripiegamento della molla avranno un moto relativo nullo in corrispondenza del fold, e un moto relativo pari a $\frac{x_D}{2}$ in corrispondenza dell'ancoraggio. È ragionevole, quindi, calcolare lo squeeze-film damping tra questi due bracci come se l'affacciamento fosse la metà di quanto sia geometricamente. Un discorso analogo vale per il tuning fork: ancora una volta un'estremità è ferma (è il punto medio dell'intero giroscopio attuato in antifase) e l'altra si muove con la massa mobile.

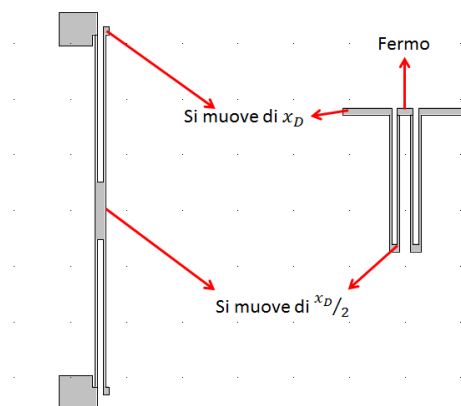


Figura 2.19: esempi molla A (a sinistra) e tuning fork (a destra).

- Squeeze-film damping delle masse esterna ed interna con i vari ancoraggi interni ed esterni e le molle A;
- Couette damping tra massa interna e leva e tra massa interna e ancoraggi interni;

Sommando tutti i contributi si giunge a un valore $b_D \approx 7 \cdot 10^{-7} \text{Ns/m}$. Bisogna, però, sottolineare come tali formule portino a un valore di b tanto più approssimato quanto più la geometria si fa complessa. Secondo dati sperimentali rilevati precedentemente da Leti con geometrie e condizioni di pressione analoghe si ottiene un fattore di qualità $Q_D \cong 1000$; con una massa m_{tot} (massa che viene attuata) = 2.4nKg e una rigidezza elastica $k_D \cong 30 \text{N/m}$ (valore simulato) si ha un fattore di smorzamento $b_D = \frac{\sqrt{k_D m_{tot}}}{Q_D} \cong 2 \cdot 10^{-7} \text{Ns/m}$. È ragionevole tenere questo come riferimento, notando comunque come questo risultato non sia molto in disaccordo con quello calcolato carta e penna.

Volendo, ora, calcolare lo smorzamento legato al moto di sense (della massa interna) bisognerà tener conto di:

- Squeeze-film damping dovuto alle molle B;
- Squeeze-film damping con gli ancoraggi interni ed esterni e con la leva;
- Couette damping con gli ancoraggi interni e la massa esterna;

Dalla somma di questi contributi (dei quali i più significativi sono squeeze-film damping dovuto alle molle B e squeeze-film damping con la leva) emerge un valore $b_s \approx 52 \cdot 10^{-7} \text{Ns/m}$; geometrie precedenti analoghe erano dotate di $Q_s \cong 1000$; con un valore $k_s \cong 20 \text{N/m}$ e una massa di sense $m_s = 1.7 \text{nKg}$ si ha $b_s = \frac{\sqrt{k_s m_s}}{Q_s} \cong 1.84 \cdot 10^{-7} \text{Ns/m}$. Ancora una volta è ragionevole riferirsi a questo valore, piuttosto che al risultato carta e penna, molto approssimativo con geometrie così complicate.

Resta aperto il problema di una corretta modellizzazione dello smorzamento, che sarà affrontato quando si avranno a disposizione i primi dati empirici. Per favorire una modellizzazione assistita da misure sperimentali sono state disegnate delle strutture di test: si tratta sempre di un z-gyro, con lo stesso principio di funzionamento. Ad esso, però, sono state aggiunte due celle a parallel plates con l'intenzione di modificare lo smorzamento nella direzione di sense (aggiungendo agli smorzamenti presenti un ulteriore squeeze-film damping) rispetto a una struttura senza tali celle. I comb-fingers interni sono utilizzati per misurare la frequenza di risonanza della massa di sense: in questo modo si possono confrontare le frequenze di risonanza di una struttura che presenti le celle a parallel plates e di un'identica struttura senza tali celle. In figura 2.23, la metà sinistra del giroscopio complessivo.

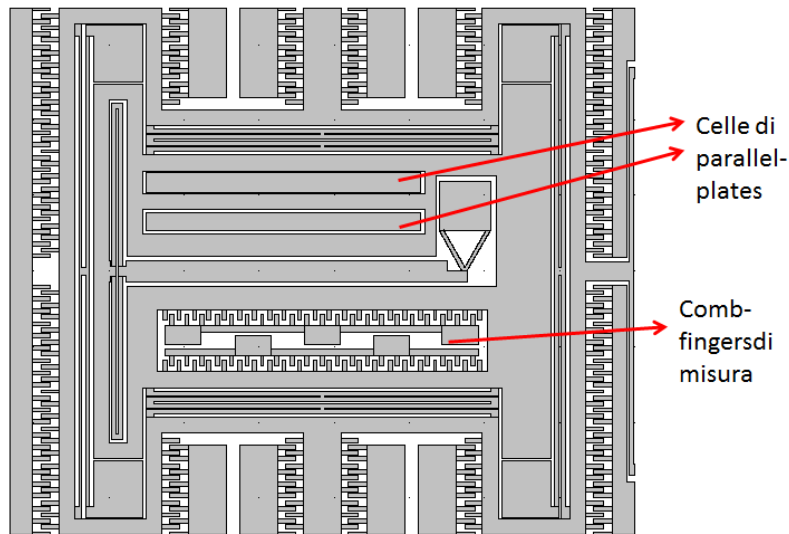


Figura 2.20: metà sinistra di un z-gyro con aggiunte celle di parallel plates e di comb fingers.

Capitolo 3 . Rumore

In questo capitolo sono discusse le tre principali sorgenti di rumore nel giroscopio, l'andamento del rumore riportato in ingresso e del rapporto segnale/rumore al variare di mismatch e fattore di qualità. Si tratta, in seguito, della regione (insieme di punti di lavoro con determinati fattori di qualità e mismatch dei modi) in cui le specifiche di progetto sono rispettate: come si vedrà in seguito, la maggior parte delle scelte progettuali è determinata dalla posizione relativa tra tale regione ed attuale punto di lavoro del giroscopio.

Sorgenti di rumore

La misura della velocità angolare è resa incerta da tre sorgenti di rumore principali, una meccanica e due elettriche:

- Rumore termo-meccanico sulle masse di sense: si dimostra che una massa posta in un ambiente a temperatura T vibra principalmente a causa del moto browniano (termico) delle particelle nell'ambiente circostante, che urtano contro di essa: è un rumore ben approssimabile come bianco e la densità spettrale della forza che agisce sulle masse è $S_B = 4k_B T b [N^2/Hz]$, dove b è il fattore di smorzamento; nel nostro caso vibrazioni che

risultano in un rumore significativo sono quelle delle masse di sense, quindi il fattore di smorzamento interessato è b_s . È utile riportare in ingresso il rumore affinché, data la banda del dispositivo, si possa ottenere dalla densità spettrale l'incertezza che si ha sulla misura della velocità angolare; per ottenere la densità spettrale di velocità angolare, si divide tale rumore per il quadrato del trasferimento dalla velocità angolare alla forza di Coriolis sulla massa di sense: $(2m_s x_D \omega_D)^2 \cdot (\frac{2\pi}{360})^2$. Si ottiene quindi:

$$(24) \quad S_{B,in} = 4k_B T b_s \frac{1}{(2m_s x_D \omega_D)^2} \left(\frac{360}{2\pi}\right)^2 [(\circ/s)^2/Hz]$$

- Rumore Johnson legato alla resistenza del nanogauge: ogni resistore presenta un rumore termico bianco dovuto al moto browniano degli elettroni che si muovono di moto termico

casuale. Tale componente c'è anche in presenza di campi elettrici, e si somma a quella di deriva. Questo fenomeno si può schematizzare attraverso un generatore equivalente di tensione in serie al resistore di resistenza R , che nel nostro caso è il nanogauge, di densità spettrale $S_{John} = 4k_B T R = 4k_B T \frac{\rho L}{\Sigma}$, dove ricordiamo ρ è la resistività del nanogauge, L e Σ rispettivamente la sua lunghezza e sezione. Il singolo nanogauge produce un'uscita del ponte di Wheatstone pari a $S_{John,V} = \frac{1}{4} 4k_B T \frac{\rho L}{\Sigma}$. L'uscita del ponte di Wheatstone dovuta allo stress subito dal singolo nanogauge è in modulo $V_{out} = V_0 \frac{\Delta R}{2R}$; così si giunge a una densità spettrale di variazione relativa di resistenza pari a $S_{John,\Delta R/R} = 4k_B T \frac{\rho L}{\Sigma} \frac{1}{V_0^2}$. La densità spettrale di stress è $S_{John,\sigma} = 4k_B T \frac{\rho L}{\Sigma} \frac{1}{V_0^2} \left(\frac{E}{GF}\right)^2$, e, infine, per ottenere la densità spettrale di rumore in ingresso basta dividere quest'ultima densità per la sensitività S :

$$(25) \quad S_{John,in} = 4k_B T \frac{\rho L}{\Sigma} \frac{1}{V_0^2} \left(\frac{E}{GF}\right)^2 \frac{1}{S^2} \left[\left(\frac{^\circ}{s}\right)^2 / Hz \right]$$

- Rumore dovuto a fluttuazioni della conduttanza del nanogauge: il nanogauge vede delle variazioni di conduttanza che possono essere descritte, secondo il modello di Hooge [13], da un rumore $1/f$ che si dimostra avere una densità spettrale di variazione relativa di resistenza $S_{1/f,\Delta R/R} = \frac{\alpha}{4NL\Sigma f}$, dove N è il numero di portatori nel nanogauge, f la frequenza e α è il fattore di Hooge, che dipende dalla qualità del cristallo di silicio (dose impiantata, energia, annealing). Data la relazione del nanogauge, per cui $\Delta R/R = \frac{GF}{E} \sigma$, si avrà una densità spettrale di stress sul nanogauge pari a $S_{1/f,\sigma} = S_{1/f,\Delta R/R} \cdot \left(\frac{E}{GF}\right)^2$. Dividendo tale densità spettrale per la sensitività, che ricordiamo trasferisce la velocità angolare in stress, si arriva ad avere una densità spettrale di rumore riportato in ingresso pari a:

$$(26) \quad S_{1/f,in} = \frac{\alpha}{4NL\Sigma f} \left(\frac{E}{GF}\right)^2 \frac{1}{S^2} \left[\left(\frac{^\circ}{s}\right)^2 / Hz \right]$$

Si intende, ora, determinare la deviazione standard associata alle fluttuazioni introdotte dalle tre sorgenti di rumore in $[^\circ/s]$, così che sia immediato il confronto con la velocità angolare in ingresso. L'uscita dell'intero sistema, come si è detto, sarà un segnale con un contenuto spettrale significativo (cioè relativo alla velocità angolare) attorno alla frequenza di drive. Così compito

dell'elettronica successiva è quello di demodulare tale segnale per poi isolare l'intervallo di frequenze che contiene l'informazione. Chiamiamo BW_{filtro} la larghezza di banda del filtro passa-basso, che sarà in accordo con la banda del giroscopio e con la frequenza massima di velocità angolare che si desidera rilevare. Il rumore Johnson e il rumore $1/f$ sono già in uscita dal dispositivo, producendo una densità spettrale di stress rispettivamente pari a $S_{John,\sigma} = 4k_B T \frac{qL}{\Sigma} \frac{1}{V_0^2} \left(\frac{E}{GF}\right)^2 \left[Pa^2/Hz\right]$ e $S_{1/f,\sigma} = \frac{\alpha}{4NL\Sigma f} \left(\frac{E}{GF}\right)^2 \left[Pa^2/Hz\right]$; d'altra parte il rumore termomeccanico è in ingresso al sistema di sense: il trasferimento attraverso tale sistema determina una densità spettrale di stress pari a $S_{B,\sigma} = S_{B,in} S^2 \left[Pa^2/Hz\right]$. Sommando le tre densità spettrali, si trova una densità spettrale di stress totale

$$(27) \quad S_{tot,\sigma} = S_{John,\sigma} + S_{1/f,\sigma} + S_{B,\sigma}$$

si può, ora, integrare tale densità spettrale nell'intervallo considerato dall'elettronica, cioè $[f_D - BW_{filtro}; f_D + BW_{filtro}]$; si ottiene una varianza

$$(28) \quad \sigma_\sigma^2 = \int_{f_D - BW_{filtro}}^{f_D + BW_{filtro}} S_{tot,\sigma} df \quad [Pa^2]$$

Infine si riporta la corrispondente deviazione standard in ingresso, per ottenere

$$(29) \quad \sigma_{in} = \sqrt{\sigma_\sigma^2} / S \quad [^\circ/s]$$

È stato steso un codice matlab (Matlab 7.0, riportato in appendice B) che calcoli numericamente tale valore al variare di parametri elettrici e geometrici del giroscopio, e, in particolare, del mismatch tra i modi e del fattore di qualità di sense e drive, generando così un grafico 3D. Si è ipotizzata costante la frequenza di sense, e sole variazioni della frequenza di drive; i valori delle masse vengono tenuti inalterati, di conseguenza k_D è fatta variare con ω_D . Inoltre, per un determinato valore di ω_D , si è ipotizzato di variare la pressione nel package, con conseguente variazione dei fattori di smorzamento e dei fattori di qualità. Si è supposto che sempre $Q_S = Q_D$, e,

di conseguenza, che $b_D \propto b_S$. Un esempio dell'andamento della deviazione standard in ingresso è riportato in figura 3.1.

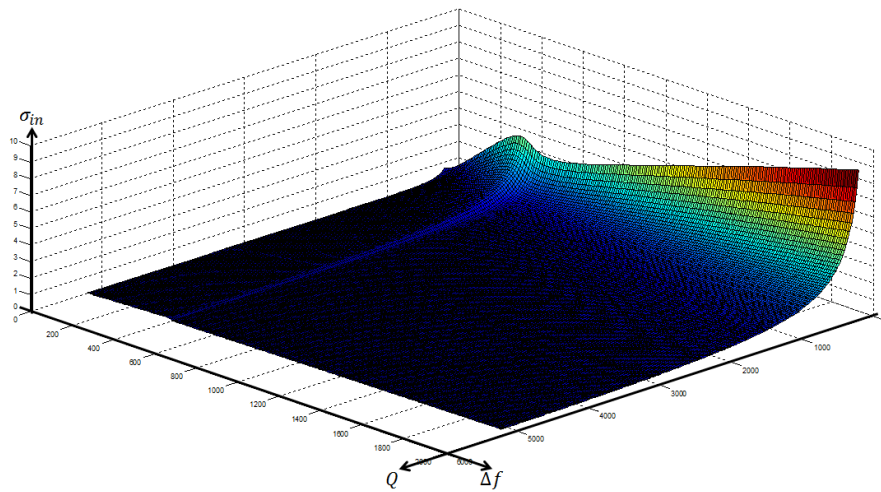


Figura 3.1: esempio dell'andamento del rumore riportato in ingresso

Si nota come il rumore tenda a crescere con il diminuire dei due fattori di qualità: questo è ragionevole, infatti il rumore in stress è diviso per la sensitività, che contiene i valori dei fattori di qualità: più Q_S e Q_D sono piccoli, più il rumore riportato in ingresso sarà significativo, ovvero il segnale in uscita al sistema sarà poco “amplificato”. Così si spiega la crescita improvvisa in corrispondenza di fattori di qualità particolarmente bassi: un andamento del tipo $1/Q^2$. D'altra parte, il rumore in ingresso aumenta con l'aumentare del mismatch: questo è dovuto al fatto che, sotto ipotesi sempre verificate, la sensitività, per cui è diviso il rumore in uscita, diminuisce con l'aumentare di Δf .

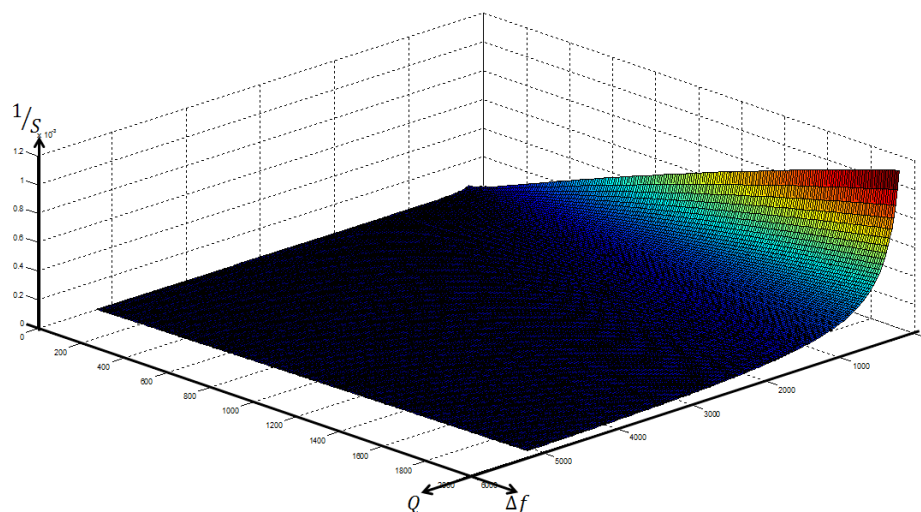


Figura 3.2: andamento dell'inverso della sensitività

In figura 3.2, il grafico di $1/S$; a conferma di quanto si è detto, si nota la somiglianza di questo andamento con quello di σ_{in} . Ciò che differenzia i due andamenti è un gradino presente per ogni valore di Q nel grafico di σ_{in} in corrispondenza di $\Delta f = 400\text{Hz}$, particolarmente evidente per bassi valori del fattore di qualità. Nel generare questo grafico si è supposto di avere un'elettronica che filtri attorno alla frequenza di drive con una larghezza totale del filtro di 800Hz , 400Hz prima di f_D e 400Hz dopo. Come si è visto, il rumore termo-meccanico in uscita ha una densità spettrale data dal prodotto di un rumore bianco (in ingresso al sistema di sense) e della risposta quadratica del sistema di sense, cioè una densità spettrale proporzionale alla risposta quadratica. Così con mismatch minori di 400Hz l'operazione di integrazione della somma delle tre densità spettrali vedrà l'integrazione di più della metà del picco della densità spettrale del rumore termo-meccanico; d'altra parte, il picco è solo in parte integrato per mismatch maggiori di 400Hz , fino a non essere più integrato per mismatch molto maggiori di 400Hz .

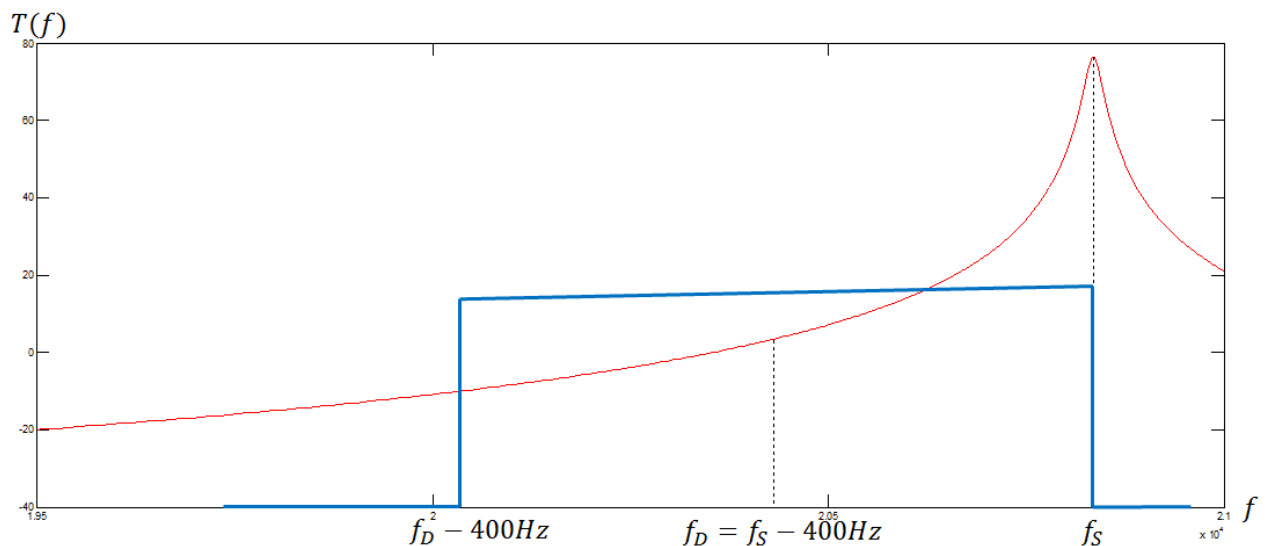


Figura 3.3: far variare il mismatch significa far variare la finestra entro cui è integrato il rumore; per mismatch oltre il caso limite, qui rappresentato, la quantità di rumore integrata è sostanzialmente costante.

Dopo questo gradino, il rumore al crescere di Δf continua ad aumentare.

Lo stesso codice è stato anche utilizzato per calcolare l'andamento del rapporto segnale-rumore in corrispondenza del massimo segnale rivelabile, $2000^\circ/S$:

$$(30) \quad \frac{S}{N} = \frac{2000^\circ / S \cdot S}{\sqrt{\int_{f_{D-BW_{filtro}}}^{f_{D+BW_{filtro}}} S_{tot,\sigma} df}} = \frac{2000^\circ / S \cdot S}{\sqrt{\sigma_\sigma^2}}$$

Di seguito, il grafico logaritmico del rapporto S/N al variare di fattore di qualità e mismatch.

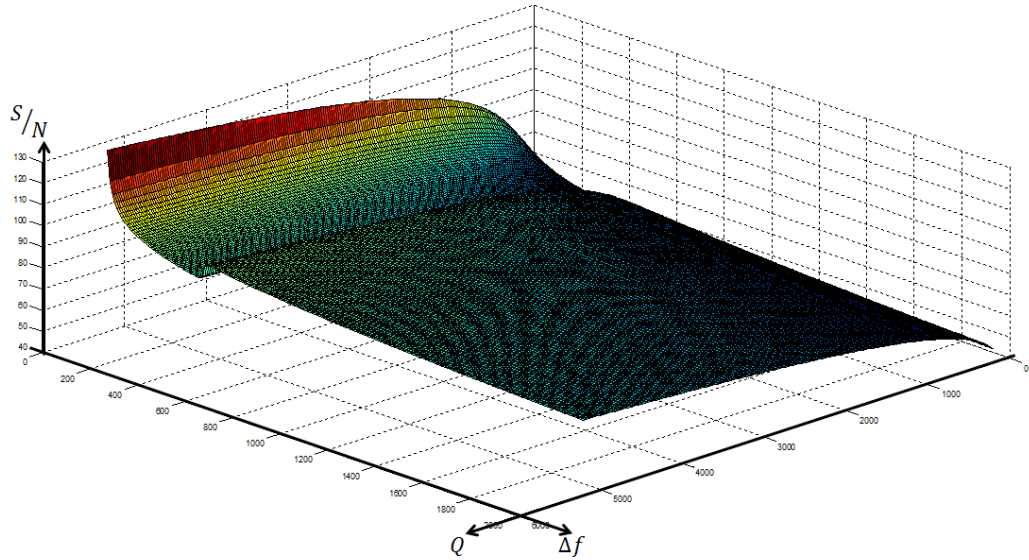


Figura 3.4: esempio dell'andamento del rapporto segnale/rumore.

Le figure seguenti riportano gli andamenti di sensitività (grafico logaritmico) e rumore integrato in uscita: quest'ultimo è influente sul rapporto segnale rumore solo in corrispondenza del gradino, di verso opposto rispetto a prima perché ora il rumore è a denominatore. Il resto dell'andamento è dovuto alla sensitività.

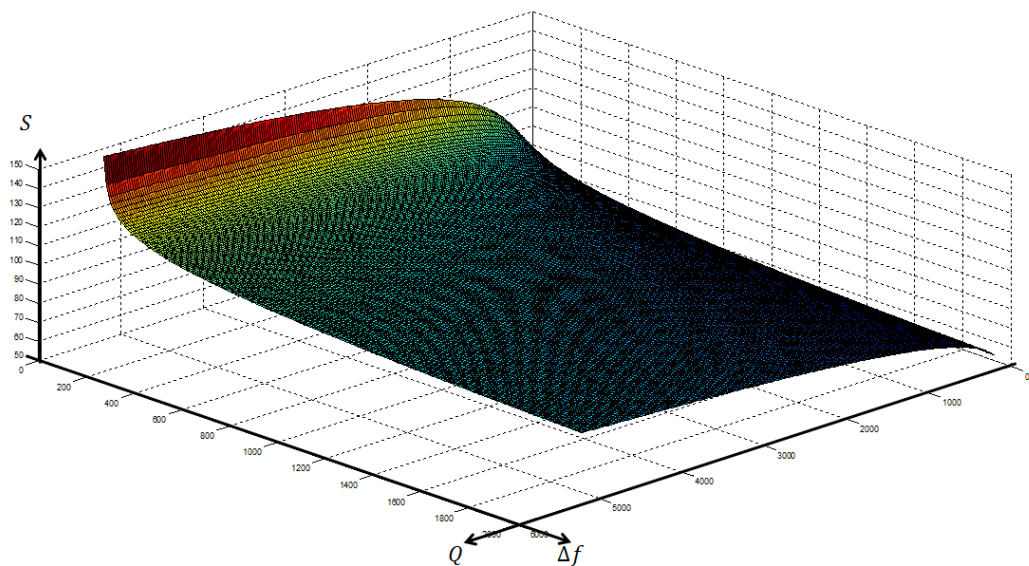


Figura 3.5: andamento della sensitività.

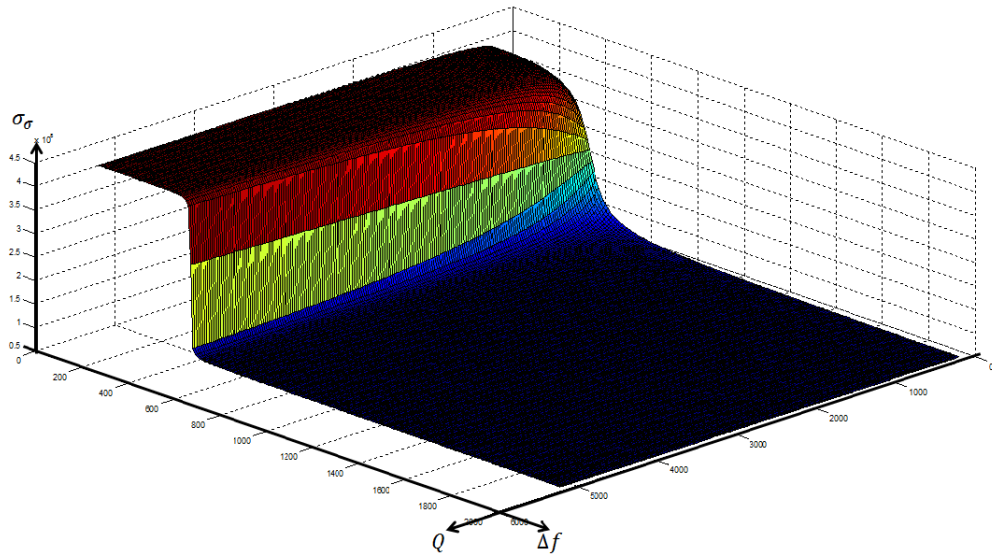


Figura 3.6: andamento del rumore in stress.

La sensibilità, a sua volta, ha un andamento dovuto al variare di tre parametri: $Q_{s,eff}$, x_D e ω_D . $Q_{s,eff}$, del quale l'andamento logaritmico è riportato sotto, decresce al crescere del mismatch, come ci si aspettava; per alti mismatch è indipendente dal fattore di qualità, mentre per bassi mismatch cresce all'aumentare di Q .

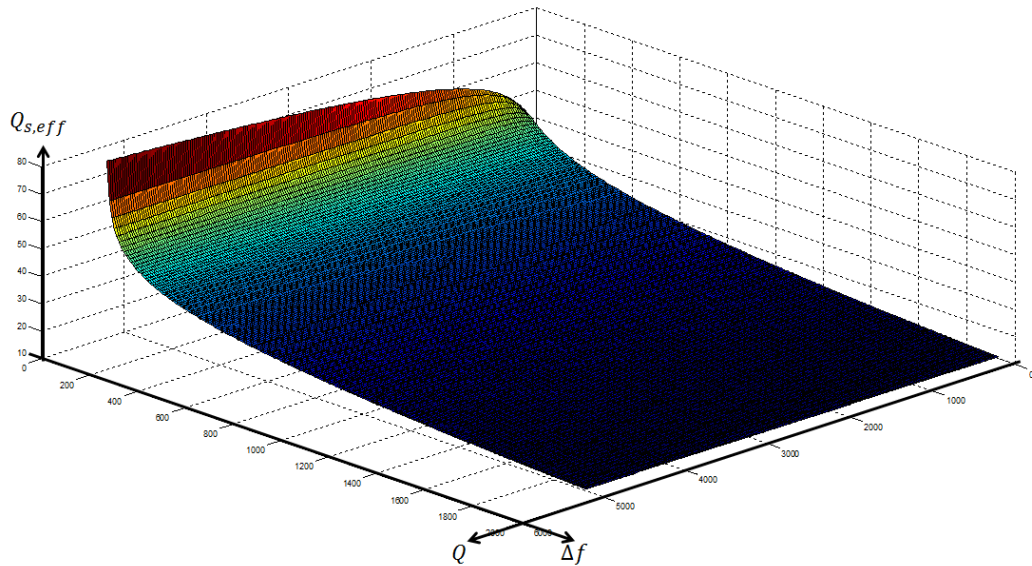


Figura 3.7: andamento di $Q_{s,eff}$.

La decrescita della sensitività col diminuire del fattore di qualità anche per alti mismatch è da attribuire a $x_D = F_D(= cost) \cdot Q_D / k_D$. Esso, a parità di Δf cresce linearmente con Q , mentre a parità di fattore di qualità, diminuisce (leggermente) col mismatch, poiché $k_D \propto f_D^2 = (f_s - \Delta f)^2$.

La decrescita di S al crescere del mismatch è dovuta, invece, sia a $Q_{s,eff}$ sia a ω_D (che diminuisce al crescere di Δf).

Specifiche del progetto: la regione dei possibili punti di lavoro

Per individuare il miglior punto di lavoro del giroscopio è necessario tener conto delle specifiche del progetto. È preferibile avere una alta sensitività, ma bisogna allo stesso tempo garantire un funzionamento lineare del nanogauge: per questo è necessario che la massima velocità angolare rivelabile, $2000^\circ/s$, produca il massimo stress che il nanogauge subisce mantenendo una relazione lineare tra stress, variazione relativa di lunghezza e resistenza: $100MPa$. Questo comporta una massima sensitività di $\frac{100MPa}{2000^\circ/s} = 50000 Pa/^\circ/s$. Inoltre c'è anche un vincolo sul rumore massimo

del sistema, espresso come rumore in ingresso al dispositivo: $0.015^\circ/s/\sqrt{Hz}$. Così il valore di

deviazione standard massimo è : $0.015^\circ/s/\sqrt{Hz} \cdot BW_{filtro} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$. Il rumore è quello totale del

giroscopio, cioè dovuto alla struttura e all'elettronica; la divisione per $\sqrt{2}$ è dovuta al fatto che il rumore che qui si tratta è quello relativo alla sola struttura; il progetto dell'elettronica avrà una stessa specifica sul rumore così che, sommando quadraticamente i rumori, si giunga al massimo al limite imposto. Figura 3.8 mostra il dominio (sfumature di rosso) in cui solo il primo vincolo è soddisfatto.

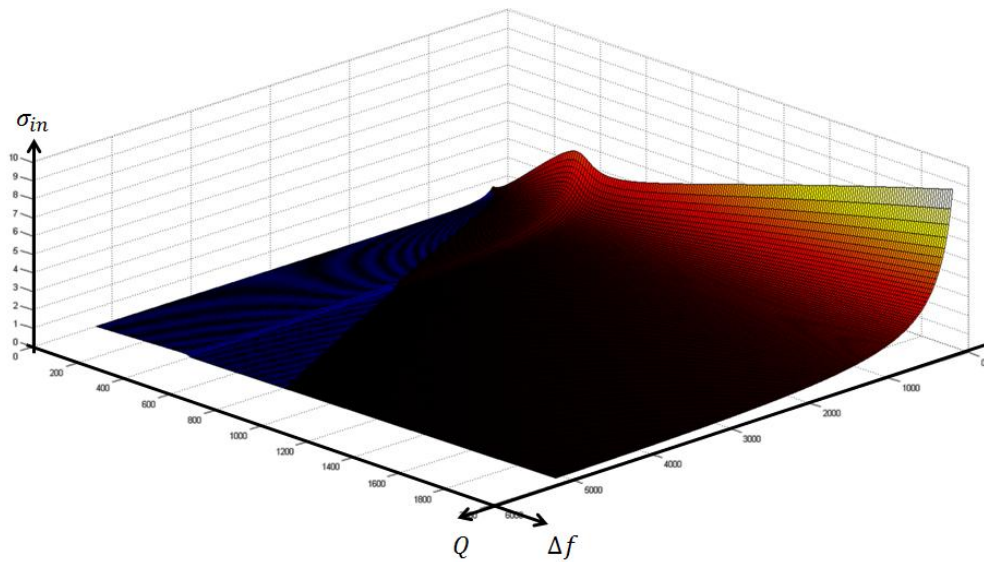


Figura 3.8: andamento del rumore riportato in ingresso e, in sfumature di rosso, regione di rispetto della specifica di sensitività.

Correttamente, la sensitività è adeguatamente bassa per alti mismatch o per bassi valori del fattore di qualità.

Il secondo vincolo è soddisfatto nel dominio rappresentato in figura 3.9 (sfumature di rosso).

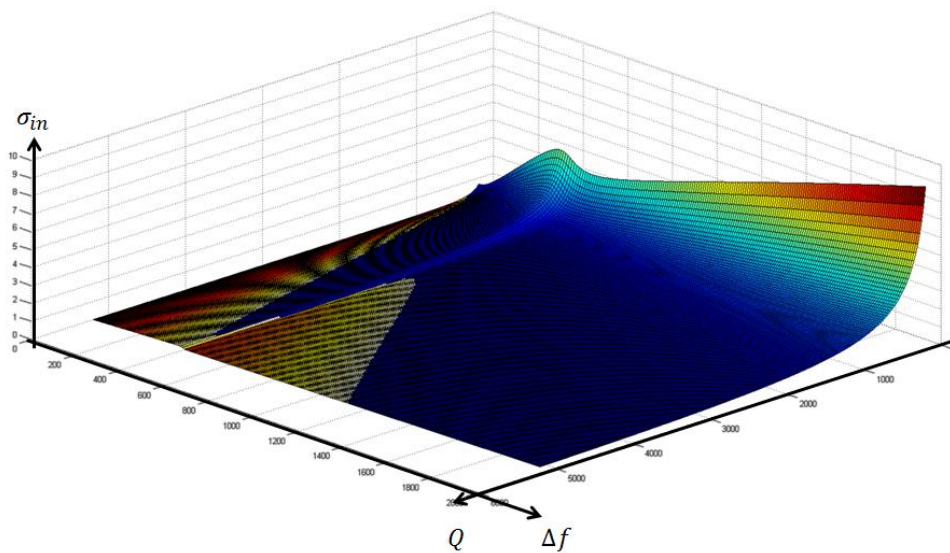


Figura 3.9: andamento del rumore riportato in ingresso e, in sfumature di rosso, regione di rispetto della specifica di rumore.

Si ha un rumore adeguatamente basso in corrispondenza di alti valori di fattore di qualità o bassi valori di mismatch, tenuto conto anche del gradino, che rende possibile l'esistenza della regione ad esso adiacente.

L'insieme dei valori di fattore di qualità e mismatch per i quali entrambi i vincoli sono soddisfatti è rappresentato nella figura 3.10, in sfumature di rosso.

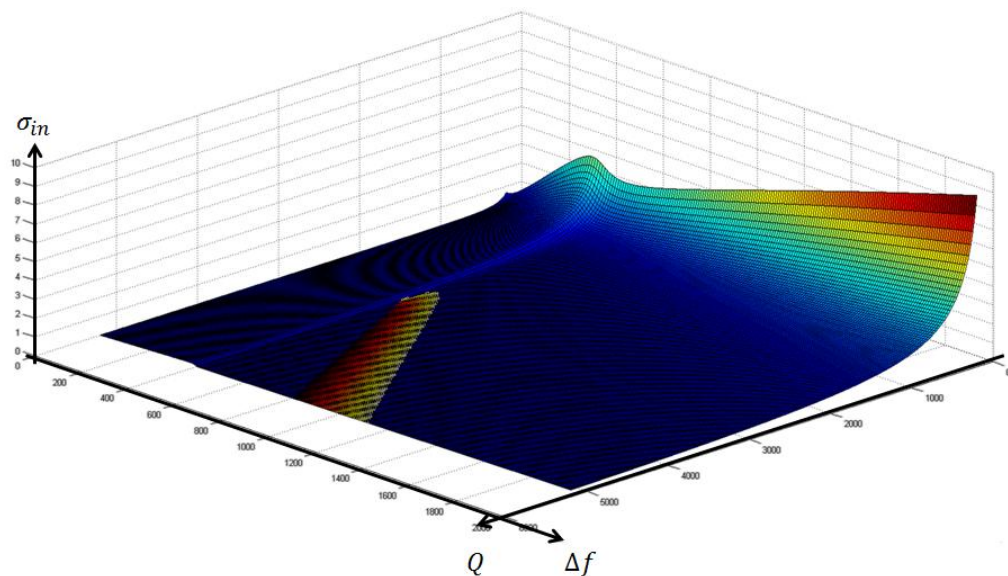


Figura 3.10: andamento del rumore riportato in ingresso e, in sfumature di rosso, regione di rispetto di entrambe le specifiche.

Il dominio di lavoro, naturalmente, cambierà col variare delle caratteristiche del giroscopio simulato. In generale si cercherà il punto ottimo di lavoro (o il luogo dei punti ottimi), in cui si abbia la sensibilità più grande possibile e il rumore più basso possibile.

Capitolo 4 . Simulazioni

A partire dalla conoscenza delle proprietà principali dei giroscopi e delle specifiche del progetto si sono progettate e simulate tre strutture: due z-giroscopi e un giroscopio xy. Tali strutture sono qui riportate, insieme al valore dei parametri che ne descrivono struttura e corretto funzionamento, discusse e confrontate tra di loro. Si parlerà, in seguito, di come imperfezioni di processo possano causare un errore nella misura della velocità angolare, fornendo, poi, l'entità di tale errore e discutendo brevemente una possibile soluzione per compensarlo.

Tutte e tre sono attuate da comb-fingers che muovono in antifase le due metà del giroscopio, separate da un tuning fork. Ognuna delle due metà è costituita da una massa esterna, una massa di sense e il sistema leva-nanogauge. Lo strumento principale che è stato utilizzato per ricavare dalle strutture i parametri fondamentali e studiarne il funzionamento è Comsol Multiphysics.

Per rendere più agevole la descrizione dei risultati ottenuti sulle simulazioni, si riassumono in seguito le principali grandezze elettromeccaniche ed i parametri oggetto di analisi per valutare il rispetto o meno delle specifiche di progetto.

- Grandezze geometriche ed elettriche:
 - Area (compresi gli statori di drive): secondo le specifiche, il sistema completo, dato dall'affiancamento di tre giroscopi ciascuno sensibile ad un asse, può essere al massimo di $1.2mm \times 1.2mm$. Sarà necessario avere un z-gyro e due xy-gyro di stessa struttura (entrambe rettangolari) ma l'una orientata ortogonalmente rispetto all'altra: di conseguenza la somma di altezza e base di ciascuno dei due xy-gyro, potrà essere al massimo pari a $1.2mm$; come mostrato in figura 4.1, la base del z-gyro potrà essere al massimo pari a quella del xy-gyro ad esso parallelo. Una possibile scelta è quella di avere tre strutture $850\mu m \times 350\mu m$.

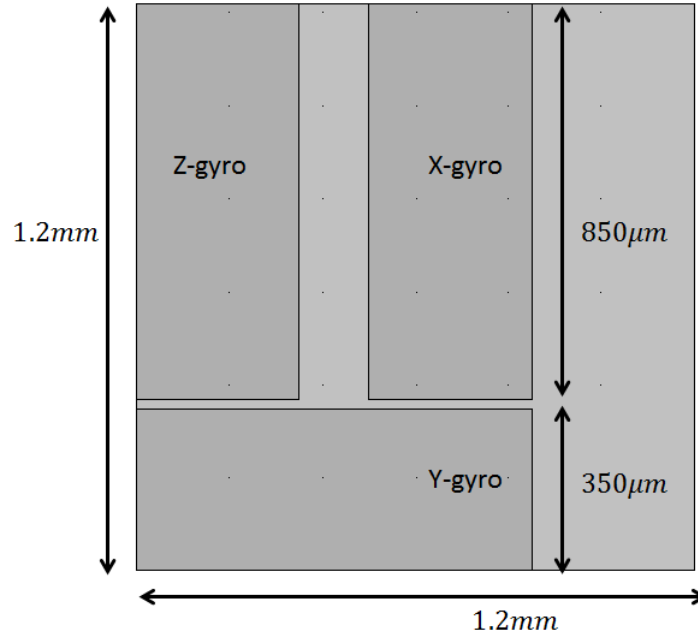


Figura 4.1: illustrazione schematica della disposizione dei tre giroscopi.

- Altezza del processo: un valore tipico per processi Leti, usato in questa tesi, è $h = 15\mu m$; è desiderabile avere strutture con valori elevati di h per avere sensibilità maggiori. Pur essendone più complicata la realizzazione tecnologica, è prevista entro la fine del progetto la produzione di strutture a $20\mu m - 30\mu m$ di altezza.
- Polarizzazione in DC e AC del sistema di attuazione: come si è detto, per ottenere elettricamente una forza di drive è necessario avere un valore fisso di tensione e una componente alla frequenza di drive. In CMOS la massima tensione senza lavorare in condizione di HV (high voltage) è $20V$: si è scelto di lavorare attorno a $V_b = 18V$; inoltre, per rispettare la condizione $v_{a,0} \ll V_b/2$; tenendo un fattore 10 di margine, si ha un valore massimo di $900mV$; il valore dell'alternata utilizzato è stato attorno agli $800mV$. Far crescere il valore della continua o dell'alternata comporta un incremento della sensibilità ($S \propto v_{a,0}V_b$), ma anche una maggiore potenza dissipata dall'intero sistema.
- Gap dei comb-fingers di drive: la distanza tra due denti affacciati; avere un valore basso significa un incremento della sensibilità innanzitutto perché $S \propto \frac{1}{g}$; inoltre bassi gap consentono di avere nella stessa dimensione un maggior numero di celle di comb-fingers e quindi maggior forza di drive e maggior sensibilità (si ricorda $S \propto N_{cell}$). Il valore minimo è $0.75\mu m$, per tenere un certo margine e minimizzare

errori legati a forze elettriche. Di qui, i gap progettati sono stati di valore attorno a $1\mu m$.

- Numero di celle di comb-fingers: nel disegno di ogni struttura si è tentato di avere un numero più alto possibile di celle per incrementare la sensibilità, nonostante la scarsa libertà che dimensioni così ridotte lasciano. Si ricorda che $S \propto 1/b_D$, e b_D è dovuto a due tipi di smorzamento: Il couette damping è proporzionale anch'esso dal numero di celle, ma lo squeeze film damping, non dipendente da N_{cell} , risulta essere dominante sul couette, rendendo così complessivamente conveniente l'aumento del numero di denti per l'aumento della sensibilità.
- Fattore di Hooge: un fattore sperimentale che definisce l'entità del rumore $1/f$ del nanogauge; esso che dipende dalla qualità del cristallo di silicio (dose impiantata, energia, annealing). Il suo valore, da letteratura [6] è $4 \cdot 10^{-5}$.
- Modulo di Young: dato un materiale, esso è il rapporto tra sforzo $\sigma[Pa]$ applicato al materiale e la sua conseguente deformazione relativa $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$. Esso decide dell'elasticità delle molle. Esso vale, per silicio monocristallino del processo Leti, $E = 169GPa$.
- Dimensioni del nanogauge: la sezione Σ del nanogauge, a cui è applicato lo stress è di $250nm \times 250nm$; la sua lunghezza è $L = 5\mu m$.
- Massa di sense: la massa interna, che subisce la forza di Coriolis e si muove conseguentemente; $m_s \approx 1.7nKg$.
- Massa attuata: è la massa a cui è applicata la forza di drive, data dalla somma della massa esterna e della massa di sense; valori attorno ai $2.5nKg$.
- Grandezze strutturali:
 - Rigidezze elastiche k_D e k_S : il rapporto tra forza applicata alla massa totale/massa di sense nella direzione di drive/sense e conseguente spostamento. Si ricavano applicando alle masse delle forze arbitrarie e valutando il rapporto tra esse e gli spostamenti ottenuti. Con frequenze di risonanza di circa $20KHz$ e masse di circa $2nKg$, si hanno rigidezze elastiche di valore attorno ai $20 - 30 N/m$ (riferendosi alla relazione $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$). Fattore di qualità di drive e sense: valori ricavati da dispositivi precedentemente prodotti sono di $Q \cong 1000$ [16]. Questo è un parametro difficile da prevedere per l'incertezza sulla pressione effettiva del package, e, anche

conoscendo la pressione, risulta difficile una corretta predizione del damping su geometrie complesse.

- Massimo spostamento nella direzione di sense al full scale: è il massimo spostamento della massa di sense quando la velocità di rotazione è la massima rivelabile, cioè $2000^\circ/s$. Per ricavare questo parametro viene calcolata, attraverso il codice matlab in appendice B, la forza di Coriolis conseguente a una rotazione di $2000^\circ/s$, ed essa è poi applicata, in Comsol Multiphysics, in versi opposti alle due masse di sense, per simulare il loro spostamento.
- Fattore di spostamento Γ : è il rapporto tra spostamento nella direzione di sense della testa della leva e spostamento conseguente nella stessa direzione della testa del nanogauge. Esso è ricavato applicando una forza arbitraria uguale ed opposta (come $1\mu N$) alle due masse di sense, simulando gli spostamenti prodotti e calcolando il valore del rapporto dei due spostamenti interessanti.
- Grandezze del sistema:
 - Frequenza di risonanza di drive e sense e banda del giroscopio: si ottiene la risonanza alle frequenze volute grazie ad opportune modifiche delle masse e delle molle, tenendo presente che $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ e $k \propto \frac{EWh^3}{L}$, dove L è la lunghezza delle molle e W la loro larghezza. nel progetto della struttura, è necessario che tali frequenze non siano eccessivamente inferiori ai $20KHz$, per evitare che disturbi nella banda audio facciano risuonare il sistema. D'altra parte la sensibilità decresce al crescere della frequenza di risonanza di sense; ci si attesta attorno ai $18 - 20KHz$, tenendo un opportuno mismatch tra i due modi per avere una banda adeguata. La differenza $f_S - f_D = BW$. Velocità angolari con banda compresa in BW sono lette correttamente.
 - Sensibilità: rapporto tra stress prodotto sul nanogauge e velocità angolare cui è sottoposto il dispositivo. Si ricorda che la sensibilità voluta è di $\frac{100MPa}{2000^\circ/s} = 50000 \frac{Pa}{^\circ/s}$.
 - Sensibilità ad accelerazioni lungo x: idealmente il sistema produrrebbe un'uscita nulla, se sottoposto ad accelerazioni lungo l'asse x, ma per varie ragioni è prodotta un'uscita significativa.
 - Sensibilità ad accelerazioni lungo y: queste accelerazioni producono uno stress sui nanogauge, ma idealmente esso è uguale per entrambi e costituisce, quindi, un segnale di modo comune; ma un'uscita è sempre prodotta.

- Sensitività ad accelerazioni lungo z: ci si aspetterebbe idealmente un valore $S_z = 0 \frac{MPa}{g}$, ma per non idealità si hanno valori non nulli.
- Rumore riportato in ingresso.
- Rapporto segnale massimo/rumore riportato in ingresso.

I parametri comuni a tutti i giroscopi sono riportati nella tabella 4.1.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
Process height	μm	15	-
Hooke's constant	-	$4 \cdot 10^{-5}$	-
Young modulus	GPa	169	-
Gauge length	μm	5	5
Gauge section	nm x nm	250x250	250x250
Gauge factor	-	45	-

Tabella 4.1: i parametri comuni a tutti i giroscopi.

z-gyroscopi: sHape

La prima struttura sensibile a velocità angolari fuori dal piano (con l'asse z come asse di rotazione) che è stata simulata è stato il giroscopio sHape, mostrato nella figura sottostante. Il nome si riferisce alla forma ad H della massa di sense.

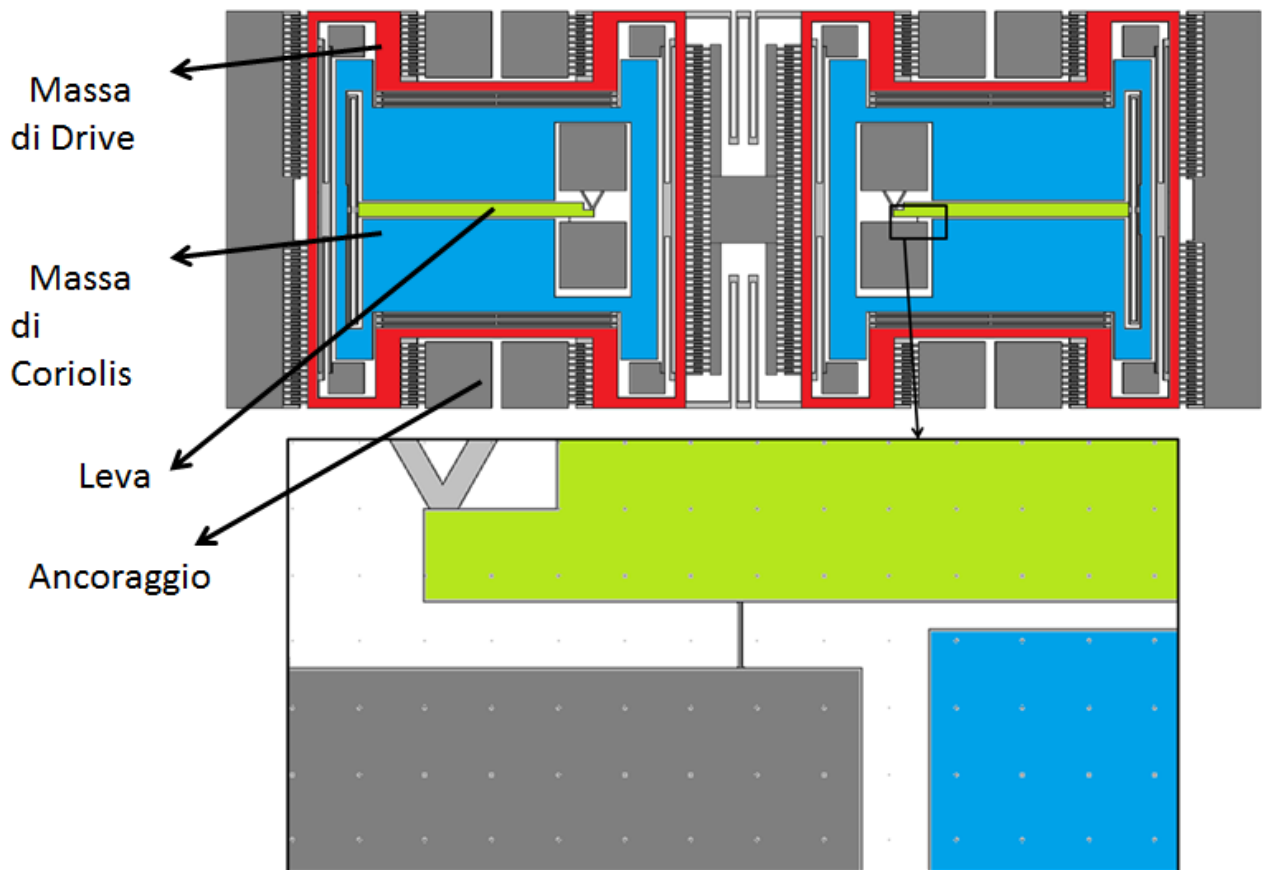


Figura 4.2: il z-gyro sHape.

Gli ancoraggi più piccoli ($30\mu m \times 30\mu m$) non permettono una polarizzazione; gli ancoraggi più grandi ($64\mu m \times 64\mu m$), invece, possono essere contattati attraverso opportune vie di metal. Si veda l'Appendice A per il processo che porta alla realizzazione degli ancoraggi. Le due masse di drive sono quelle direttamente attuate in antifase da un sistema di driving basato su comb-fingers; esse imprimono il moto di drive anche alle masse di Coriolis grazie a molle opportune. In presenza di rotazioni, le masse di sense si muovono in antifase in direzione y e, attraverso la leva esercitano uno stress uguale in modulo ma di segno opposto sui due nanogauges.

- sHape: grandezze geometriche ed elettriche; la tabella sottostante riporta le grandezze geometriche ed elettriche del giroscopio.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
Area (including driving stators)	$\square\text{m} \times \square\text{m}$	350x850	350x850
DC drive voltage	V	15	20
AC drive voltage	V	0.74	0.9
Drive fingers gap	$\square\text{m}$	1.1	0.75
Drive fingers number	-	78	-
Sensing mass	kg	$1.75 \cdot 10^{-9}$	-
Driven mass	kg	$2.8 \cdot 10^{-9}$	-

Tabella 4.2: grandezze geometriche ed elettriche dello sHape.

- sHape: grandezze strutturali.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
k_s	N/m	32.84	-
K_d	N/m	38.58	-
Drive mode quality factor	-	1000	-
Sense mode quality factor	-	1000	-
Maximum y-displacement at full-scale	nm	27	-
Displacement factor	-	0.07	-

Tabella 4.3: grandezze strutturali dello sHape.

- sHape: grandezze di sistema.
 - Frequenza di risonanza di drive e sense e larghezza di banda. Il sistema presenta più modi di risonanza e corrispondenti spostamenti periodici, come mostrato in

appendice C, ma i due modi interessanti ai fini di un buon funzionamento sono quelli in antifase in direzione di drive e in antifase in direzione y. È stato opportuno progettare le molle e le masse in modo che tali modi fossero più lontani possibile (in frequenza) dagli altri modi, che non devono essere eccitati. Di seguito, il moto risonante simulato di drive e di sense delle masse: la sua entità è stata enfatizzata dal software perché fosse più visibile. Questa simulazione, come anche le seguenti, è stata fatta eliminando i comb-fingers, che avrebbero reso la struttura troppo complicata per essere simulata, e rimpiazzandone la massa (per mantenere la frequenza di drive) con masse disposte in modo simmetrico sulla massa esterna (rossa).

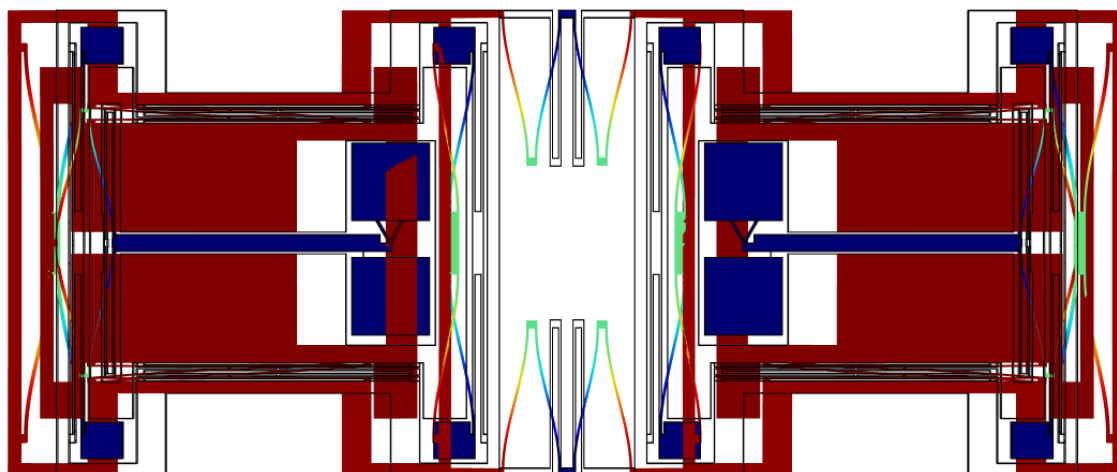


Figura 4.3: modo di drive dello sHape.

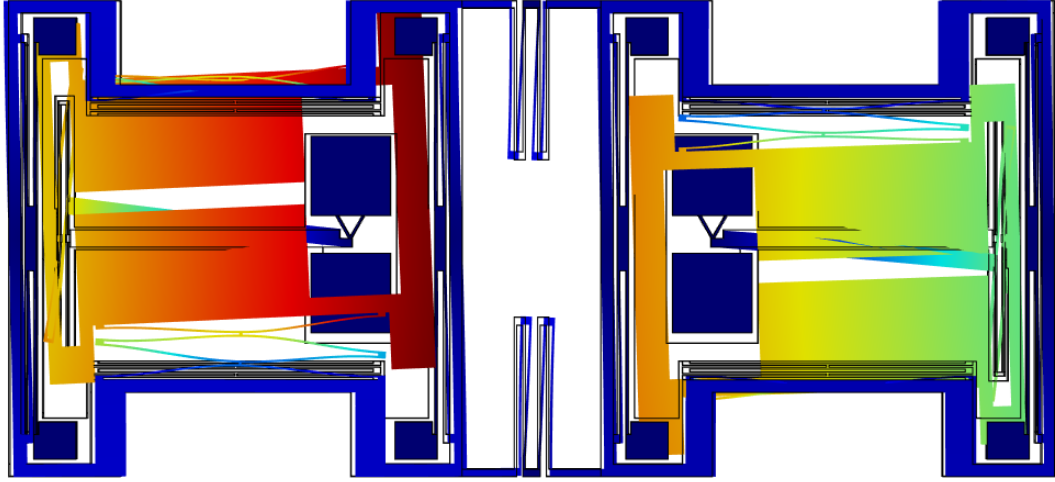


Figura 4.4: modo di sense dello sHape.

I valori delle due frequenze di risonanza sono $f_D = 18.665 \text{ KHz}$ e $f_S = 19.242 \text{ KHz}$; ne consegue una banda di 577 Hz .

- In tabella 4.4 sono riportati i valori della sensitività del singolo nanogauge. Per ottenere il valore della sensitività meccanica è stata applicata, in Comsol Multiphysics, alla massa di Coriolis la forza di Coriolis corrispondente a $\omega_a = 2000^\circ/\text{s}$; si è verificato il valore dello stress prodotto sul nanogauge, e si è ottenuto $S = \frac{\sigma}{2000^\circ/\text{s}}$. La sensitività ottenuta supera il valore massimo di circa 1%: questo potrebbe comportare un comportamento leggermente non lineare del nanogauge per velocità angolari vicine al full scale. Sensitività minori avrebbero, tuttavia, violato il vincolo sul rumore; si è preferito, quindi, ottimizzare la struttura come detto. La sensitività nelle tre direzioni alle accelerazioni esterne è stata valutata applicando all'intero giroscopio una forza per unità di volume in direzione x,y,z pari a $9.8 \text{ N}/\text{m}^3$, corrispondente a $1g$. Verificato il valore dello stress prodotto sul nanogauge, si è ricavato, per accelerazioni sui tre assi, $S_{x,y,z} = \frac{\sigma_{x,y,z}}{1g_{x,y,z}}$.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
Mechanical Sensitivity	Pa/(°/s)	$5.2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
Sensitivity to x-direction acceleration	MPa/g	$6 \cdot 10^{-4}$	-
Sensitivity to y-direction acceleration	MPa/g	1.1	-
Sensitivity to z-direction acceleration	MPa/g	$1.5 \cdot 10^{-3}$	-

Tabella 4.4: sensitività dello sHape.

- Rumore riportato in ingresso. Secondo le modalità già descritte nel capitolo 3, è stato generato l'andamento del rumore riportato in ingresso al variare del mismatch e del fattore di qualità. In figura 4.5 è rappresentato tale andamento, in sfumature di blu, e il dominio in cui le specifiche di progetto soddisfatte, in sfumature di rosso.

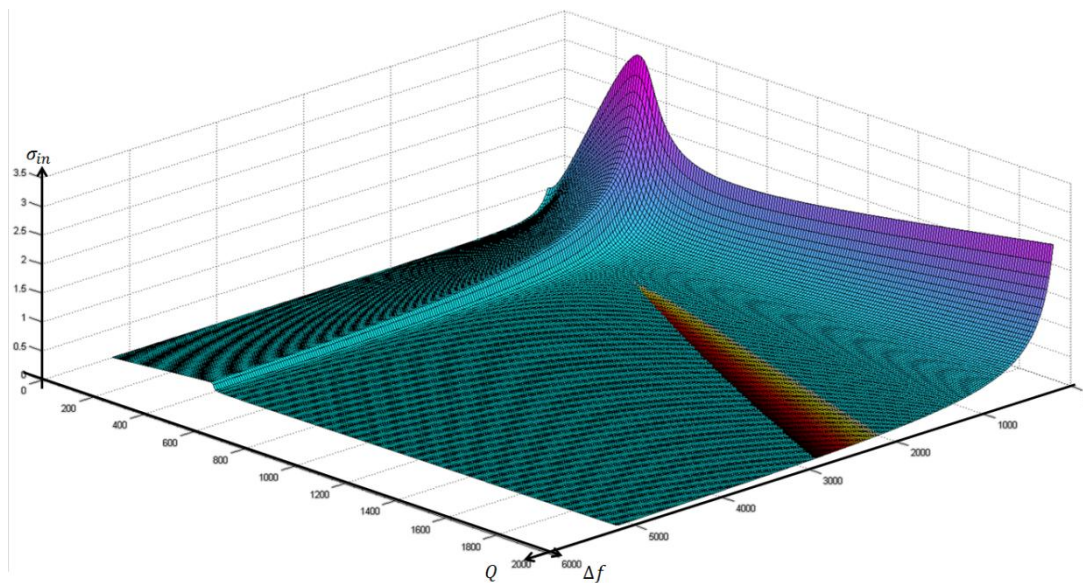


Figura 4.5: andamento del rumore riportato in ingresso di sHape.

- Rapporto segnale massimo/rumore riportato in ingresso. Figura 4.6 mostra il suo andamento, mentre figura 4.7 mette in evidenza il luogo dei punti di lavoro che soddisfano le specifiche di progetto.

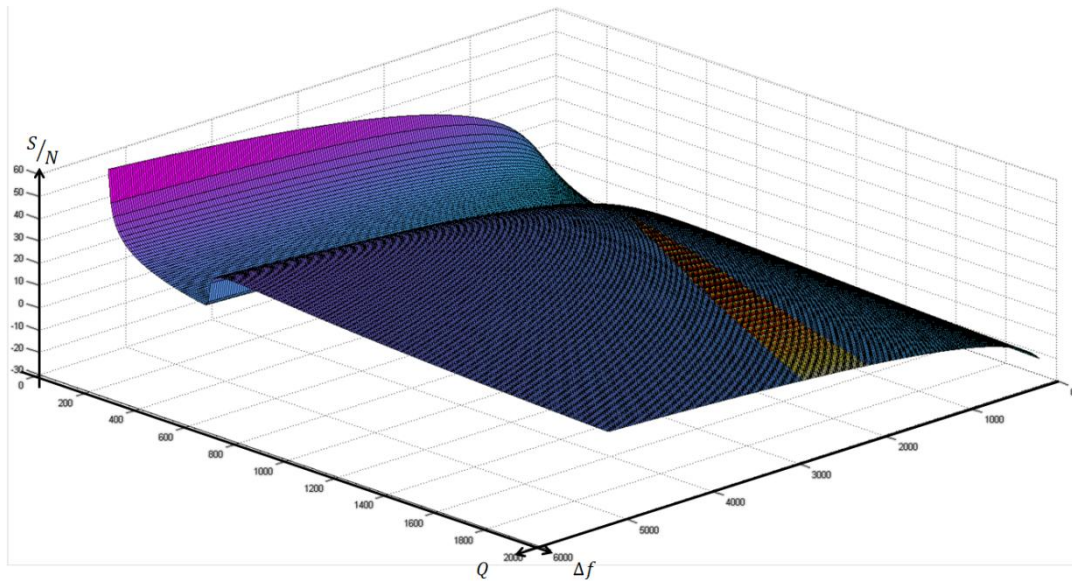


Figura 4.6: andamento del rapporto S/N di sHape.

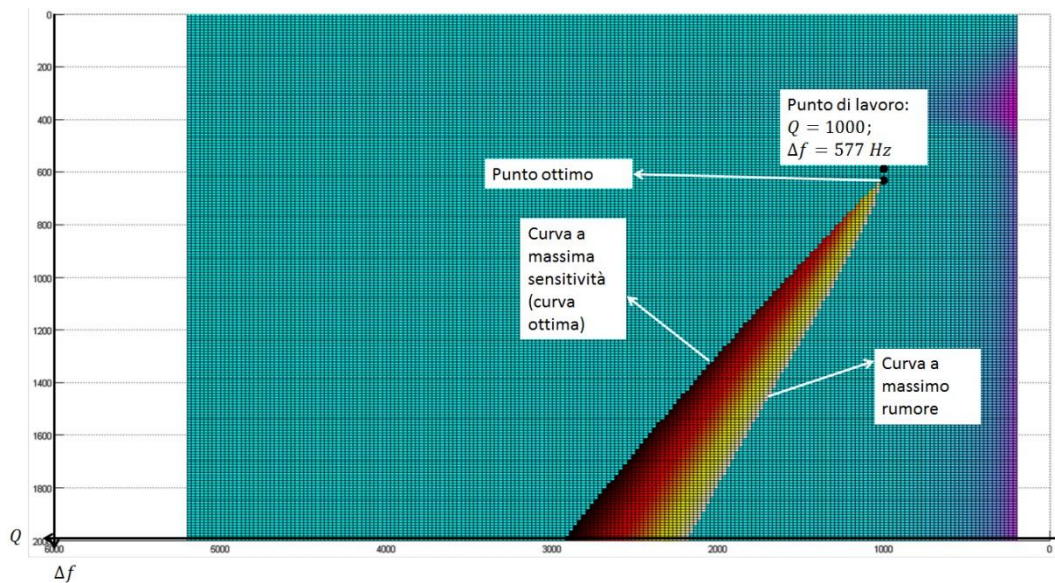


Figura 4.7: regione dei punti di lavoro di sHape che rispettano le specifiche.

Il dominio di rispetto delle specifiche è definito dalle curve a sensibilità massima e a rumore massimo; in tale dominio i punti di lavoro ottimi sono quelli a minor rumore e più alta sensibilità, cioè quelli della curva a massima sensibilità, che vedono miglior rapporto S/N. In particolare, di questa “sub-regione” ottima, i punti di lavoro più accessibili sono quelli a Q più basso per ragione di pressione e vincoli di tecnologia. Risulta, quindi, evidente come il punto ottimo più facilmente ottenibile risulta essere quello indicato in figura 4.7. Per rientrare nella regione di interesse sarebbe necessario innanzitutto un maggior mismatch: questo non è difficile da ottenere, apportando

modifiche opportune alle molle di drive e sense, o alle masse; è necessario, inoltre, avere un fattore di qualità maggiore: questo può risultare problematico perché, come già accennato, questo parametro è difficile da controllare.

z-gyroscoopi: LIBRA

Il principio di funzionamento di questo secondo z-gyro è lo stesso del precedente dispositivo: le due masse esterne (rosse) sono attuate da comb-fingers; grazie alle molle, le masse di sense (azzurre) sono mosse in direzione x e si muovono lungo y in presenza di rotazioni, esercitando uno stress sulnanogauge grazie alla leva. In questo caso si ha un'unica leva con un hinge centrale (questo motiva anche il nome dato al giroscopio): grazie ad essa i nanogauges vedono solo segnali differenziali, in accordo con il moto in antifase delle masse di sense. La ragione principale per cui è stata introdotta questa alternativa al giroscopio sHape è una migliore reiezione delle accelerazioni esterne lungo y, grazie alla unica leva; un secondo vantaggio è una maggior compattezza della struttura, e conseguente risparmio di area. Nella struttura precedente le due masse di Coriolis potrebbero, per mismatch di processo, mostrare frequenze di risonanza di sense diverse: un ulteriore vantaggio di questa struttura è che tale possibilità è evitata grazie alla leva unica.

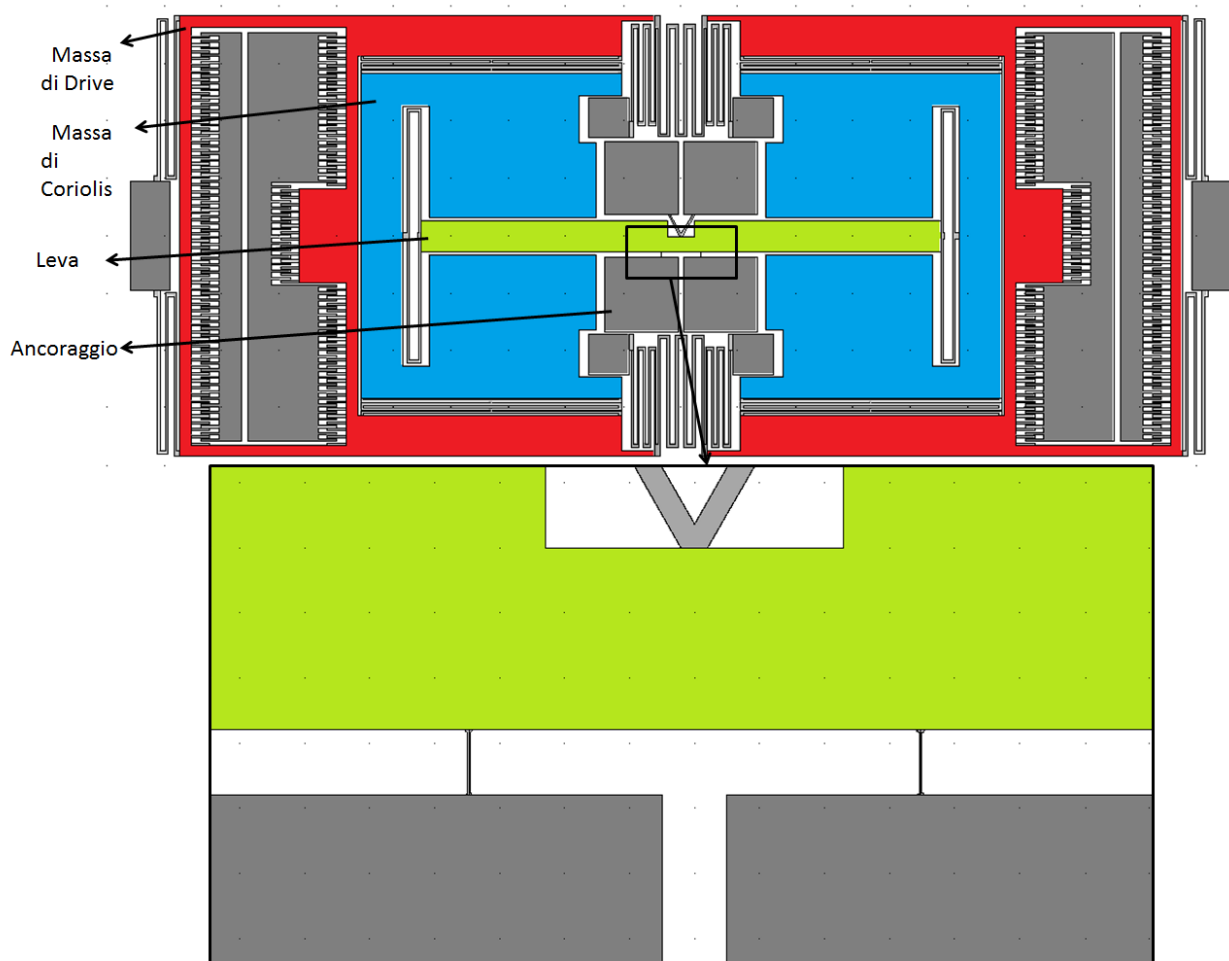


Figura 4.8: il z-gyro LIBRA.

- LIBRA: grandezze geometriche ed elettriche; la tabella sottostante riporta le grandezze geometriche ed elettriche del giroscopio.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
Area (including driving stators)	$\square\text{m} \times \square\text{m}$	350x850	350x850
DC drive voltage	V	15	20
AC drive voltage	V	0.85	0.9
Drive fingers gap	$\square\text{m}$	1.1	0.75
Drive fingers number	-	59	-
Sensing mass	kg	$1.8 \cdot 10^{-9}$	-
Driven mass	kg	$3.1 \cdot 10^{-9}$	-

Tabella 4.5: grandezze geometriche ed elettriche del LIBRA.

Essendo più compatta la struttura si è anche ridotto il numero di comb-fingers di attuazione, ma la conseguente diminuzione di sensitività è stata compensata da una riduzione del gap: si è passati da $1.5 \mu\text{m}$ a $1.1 \mu\text{m}$.

- LIBRA: grandezze strutturali.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
k_s	N/m	28.07	-
K_d	N/m	40.6	-
Drive mode quality factor	-	1000	-
Sense mode quality factor	-	1000	-
Maximum y-displacement at full-scale	nm	42	-
Displacement factor	-	0.07	-

Tabella 4.6: grandezze strutturali di LIBRA.

È apprezzabile il miglioramento del fattore di spostamento (Γ) di circa un fattore 1.4, grazie alla nuova geometria; è cresciuto notevolmente anche il massimo spostamento della massa di sense a $2000^\circ/s$.

- LIBRA: grandezze di sistema.
 - Frequenza di risonanza di drive e sense e larghezza di banda. A parte un certo numero di modi spuri, i modo interessanti sono quelli di drive e sense in antifase. Ancora una volta per simulare i modi della struttura, i combs sono stati sostituiti da elementi di pari massa e gli spostamenti sono stati enfatizzati perché fossero più visibili.

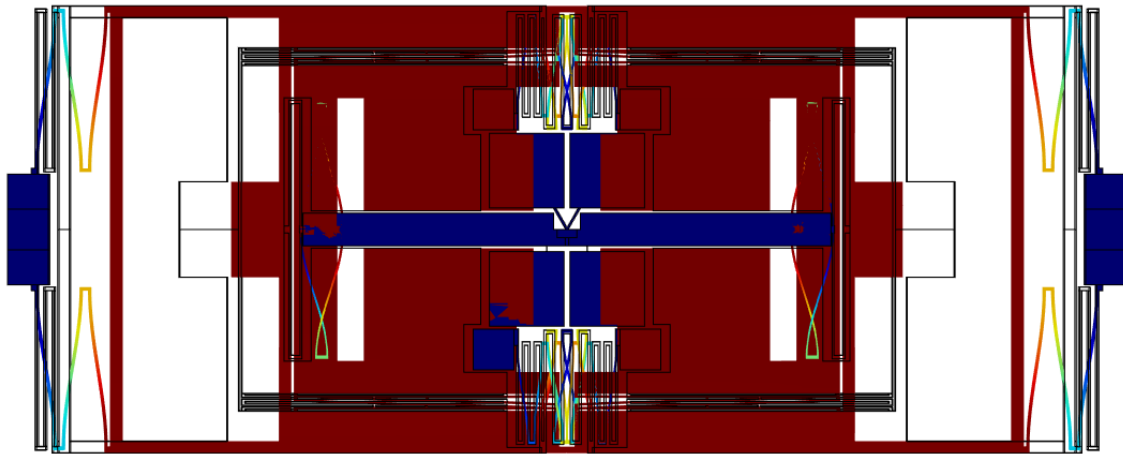


Figura 4.9: modo di drive del LIBRA.

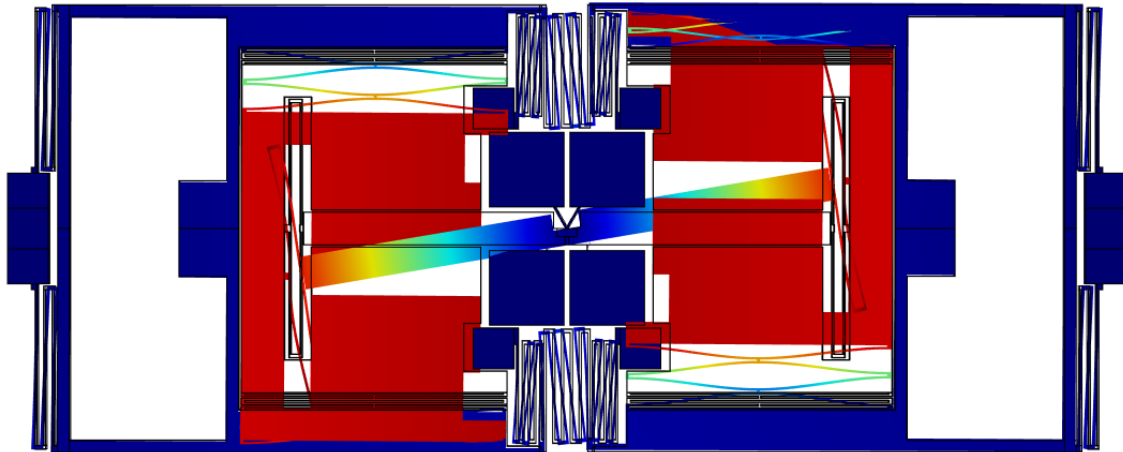


Figura 4.10: modo di sense del LIBRA.

I valori delle frequenze di risonanza sono $f_D = 18,561 \text{ KHz}$ e $f_S = 19,153 \text{ KHz}$, con una banda conseguente di $BW = 592 \text{ Hz}$.

- Di seguito sono riportati i valori della varie sensitività.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
Mechanical Sensitivity	Pa/(°/s)	$4.7 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
Sensitivity to x-direction acceleration	MPa/g	$14 \cdot 10^{-4}$	-
Sensitivity to y-direction acceleration	MPa/g	$35 \cdot 10^{-3}$	-
Sensitivity to z-direction acceleration	MPa/g	$35 \cdot 10^{-4}$	-

Tabella 4.7: sensitività del LIBRA.

La sensitività meccanica, rispetto al caso precedente, è sostanzialmente inalterata. Nonostante il dispositivo sia più sensibile di un fattore 2 ad accelerazioni esterne lungo x, esso è 2 ordini di grandezza meno sensibile ad accelerazioni lungo y, come si desiderava. La sua risposta è sostanzialmente invariata per accelerazioni sull'asse z.

- Rumore riportato in ingresso. Di seguito, l'andamento del rumore riportato in ingresso, date le caratteristiche del LIBRA e al variare di fattore di qualità e mismatch.

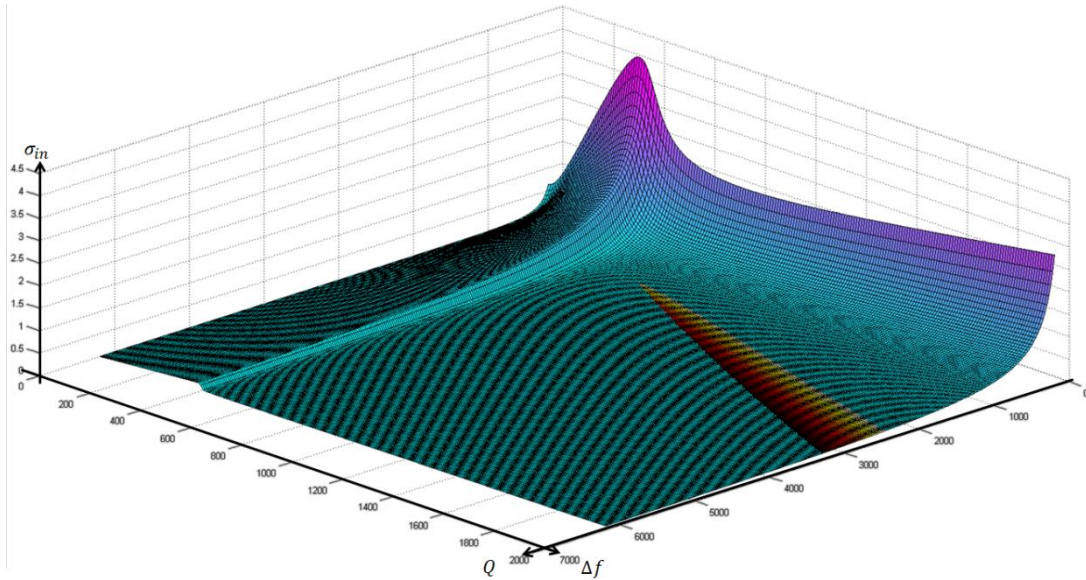


Figura 4.11: andamento del rumore riportato in ingresso di LIBRA.

- Rapporto segnale massimo/rumore riportato in ingresso. Nelle figure sottostanti si rappresenta l'andamento e il dominio di rispetto delle specifiche.

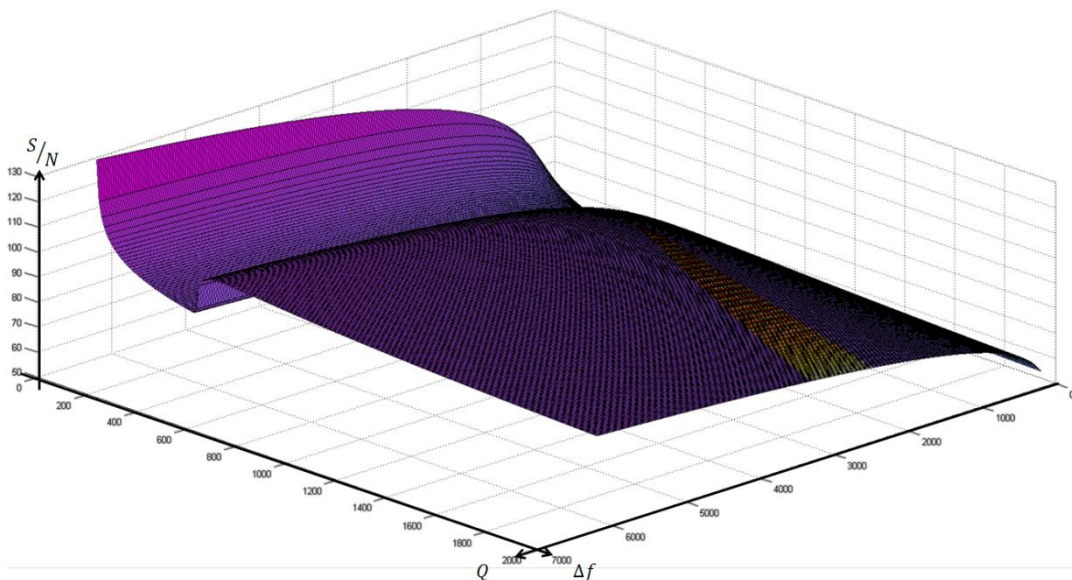


Figura 4.12: andamento del rapporto S/N di LIBRA.

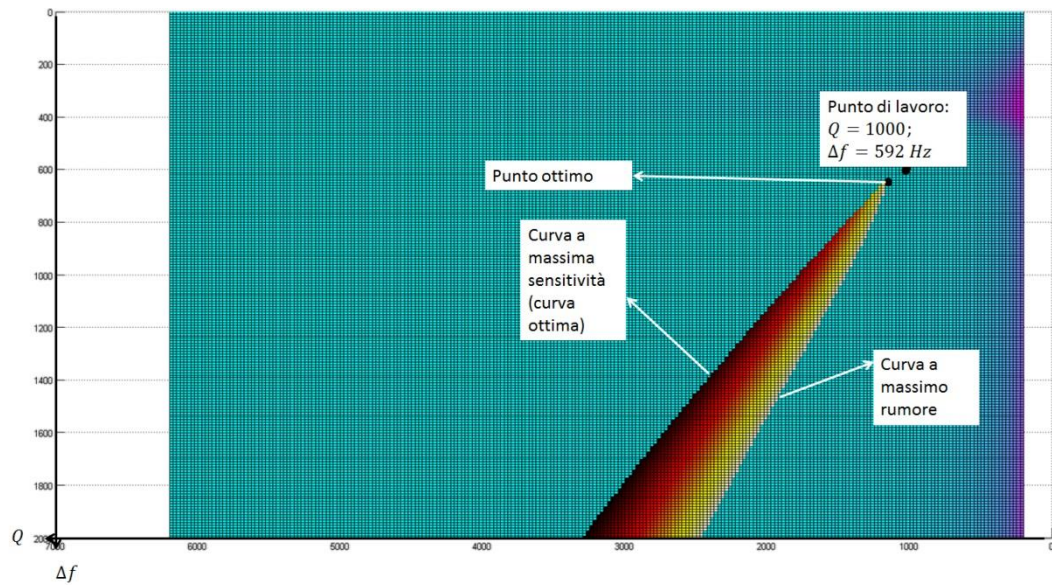


Figura 4.13: regione dei punti di lavoro di LIBRA che rispettano le specifiche.

Anche questa volta i punti di lavoro in cui conviene far funzionare il dispositivo sono quelli sulla curva a massima sensibilità, in particolare il punto più facile da raggiungere, perché a minor Q , è quello indicato in figura 4.13. Sarebbe opportuno spostare l'attuale punto di lavoro, aumentando il mismatch, agendo facilmente sulla struttura, e ottenendo un fattore di qualità maggiore, più difficile da controllare.

xy giroscopio: proXY

Identicamente ai casi precedenti, le due masse esterne sono attuate in direzione x e trasmettono tale moto alle masse interne. Queste ultime, però, per le molle che le vincolano alle masse esterne, possono muoversi in direzione z: si è, quindi, sensibili a rotazioni attorno all'asse y. Con il moto in antifase in direzione z delle masse di sense, le due leve ruotano uscendo dal piano attorno al loro perno, al centro del giroscopio, ed esercitano uno stress torsionale sui due nanogauges attraverso la struttura verde nella figura sottostante.

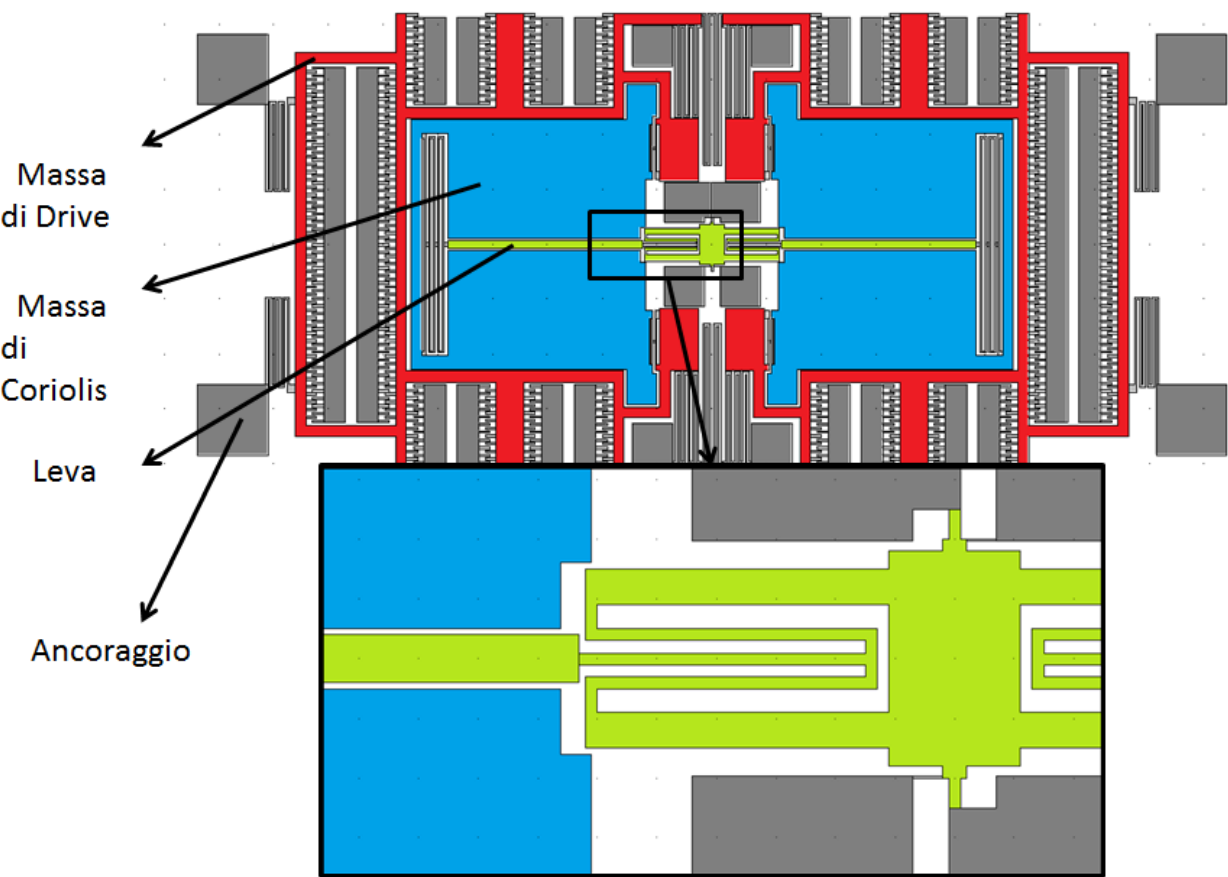


Figura 4.14: xy-gyro.

- proXY: grandezze geometriche ed elettriche; la tabella sottostante riporta le grandezze geometriche ed elettriche del giroscopio.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
Area (including driving stators)	□m x □m	350x850	350x850

DC drive voltage	V	15	20
AC drive voltage	V	0.9	0.9
Drive fingers gap	μm	1.1	0.75
Drive fingers number	-	62	-
Sensing mass	kg	$1.44 \cdot 10^{-9}$	-
Driven mass	kg	$2.2 \cdot 10^{-9}$	-

Tabella 4.8: grandezze geometriche ed elettriche di proXY.

- proXY: grandezze strutturali.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
k_s	N/m	18.18	-
K_d	N/m	31.35	-
Drive mode quality factor	-	1000	-
Sense mode quality factor	-	1000	-
Maximum y-displacement at full-scale	nm	94	-
Displacement factor	-	0.015	-

Tabella 4.9: grandezze strutturali di proXY.

Il massimo spostamento delle masse di sense in direzione z è più del doppio di quello del giroscopio LIBRA: a sostanziale parità delle masse di sense, di forza di drive e frequenze di risonanza, infatti, qui le costanti elastiche di drive e di sense è minore di quella dello z-gyro e, di conseguenza, a parità di forza applicata, la massa si sposterà di più. D'altra parte il fattore Γ è circa 6 volte più piccolo di quello del libra: si ricorda, infatti, come in questo caso non sia stato possibile ottimizzare la coppia leva-nanogauge poiché il secondo braccio (la distanza tra fulcro e testa del nanogauge) dipende dall'altezza di processo e di conseguenza non è arbitrariamente modificabile.

- proXY: grandezze di sistema.

- Frequenza di risonanza di drive e sense e larghezza di banda. Secondo le modalità già descritte per i due z-gyro, sono stati simulati i modi di drive e sense del sistema. Di seguito, una loro rappresentazione enfaticizzata.

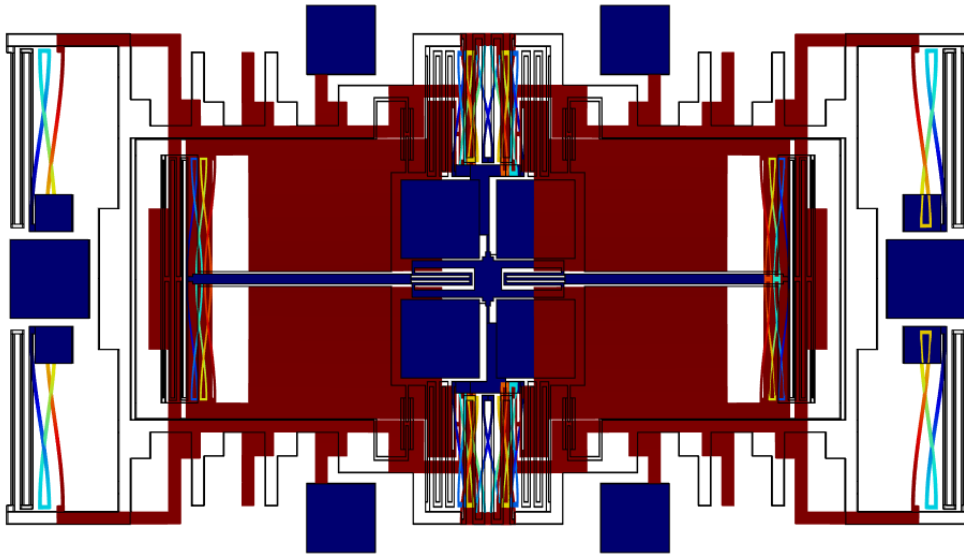


Figura 4.15: modo di drive di proXY.

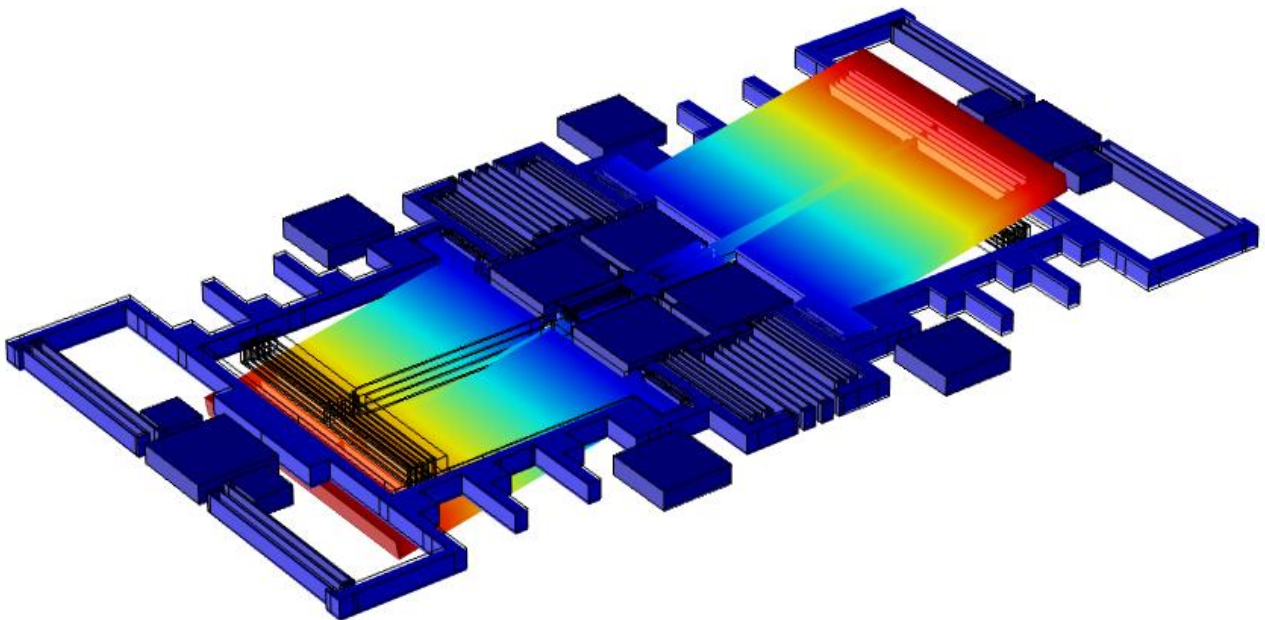


Figura 4.16: modo di sense di proXY.

Sono stati ottenute delle frequenze $f_D = 18.627 \text{ KHz}$ e $f_S = 19.201 \text{ KHz}$, con una banda conseguente $BW = 574 \text{ Hz}$.

- Di seguito sono riportati i valori della varie sensitività.

Quantity	Unit	Value	Max/Min value
Mechanical Sensitivity	Pa/(°/s)	$1.8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
Sensitivity to x-direction acceleration	MPa/g	$29 \cdot 10^{-3}$	-
Sensitivity to y-direction acceleration	MPa/g	$8 \cdot 10^{-6}$	-
Sensitivity to z-direction acceleration	MPa/g	$2 \cdot 10^{-4}$	-

Tabella 4.10: sensitività di proXY.

La sensitività è 2.3 volte minore rispetto a quella di LIBRA: questo deriva da una parte dall'avere delle costanti elastiche più piccole, e quindi più favorevoli per la sensitività, di quelle del LIBRA di circa un fattore 2 e, dall'altra parte, da un fattore di spostamento più sfavorevole rispetto a quello del z-gyro di circa un fattore 6.

- Rumore riportato in ingresso. Dati i parametri caratteristici di proXY, è stato generato l'andamento del rumore riportato in ingresso del giroscopio, rappresentato in figura 4.17.

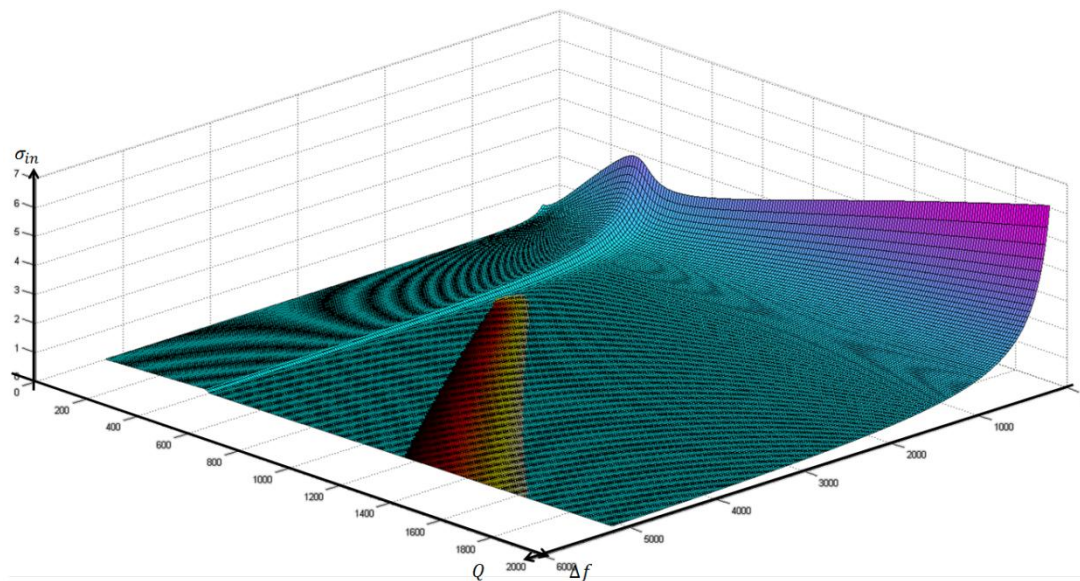


Figura 4.17: andamento del rumore riportato in ingresso di proXY.

- Rapporto segnale massimo/rumore riportato in ingresso. Nelle figure sottostanti si rappresenta l'andamento e il dominio di rispetto delle specifiche. Si nota ancora come il luogo di punti ottimi sia la curva a massima sensitività.

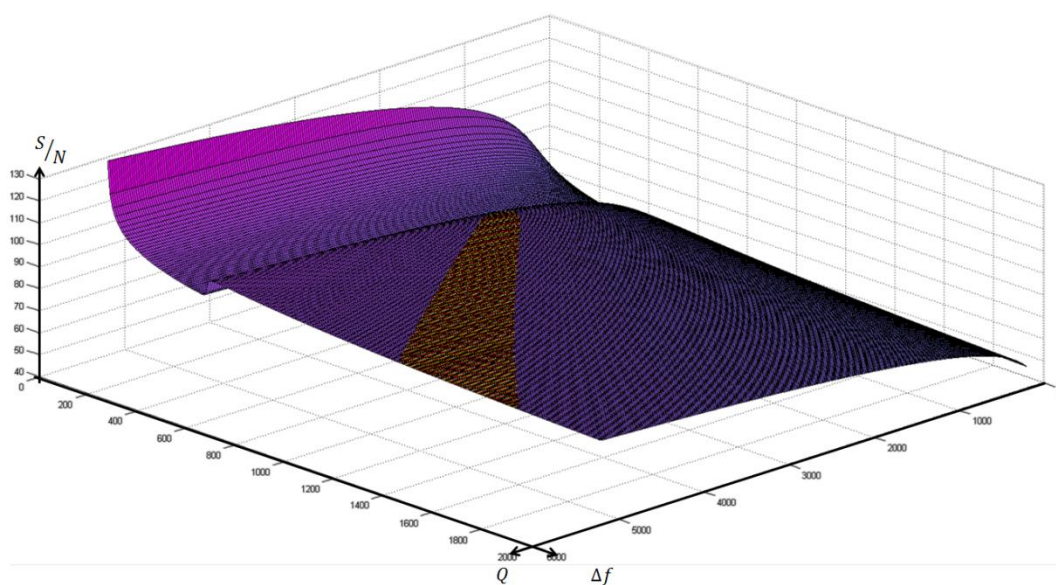


Figura 4.18: andamento del rapporto S/N di proXY.

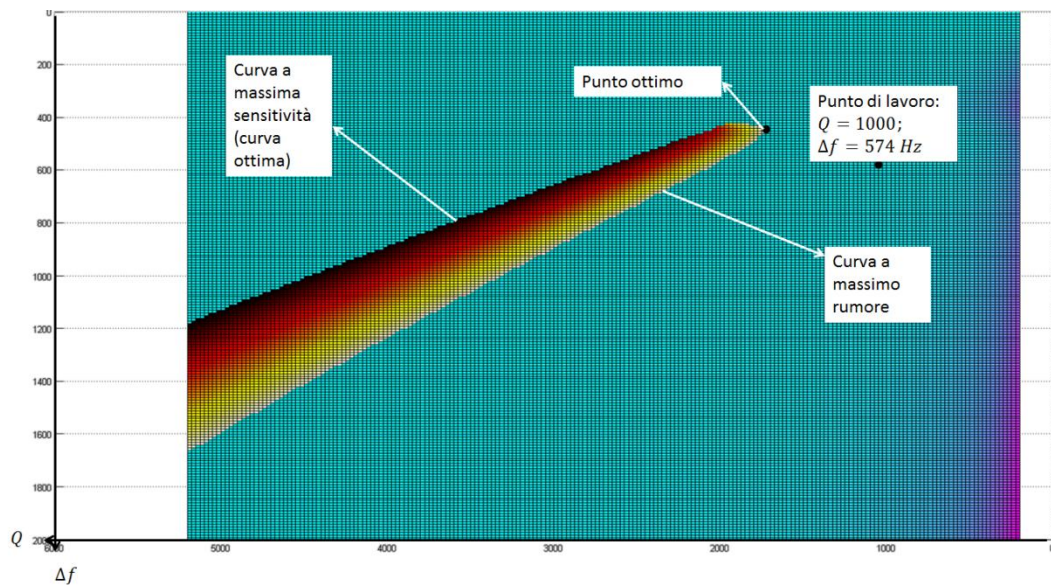


Figura 4.19: regione dei punti di lavoro di proXY che rispettano le specifiche.

Si nota, qui, come la regione di rispetto delle specifiche si sia spostata rispetto ai due casi precedenti: questo è dovuto ad una minor sensibilità, da attribuirsi fondamentalmente ad un fattore Γ più piccolo degli altri due casi di circa un fattore 4.7; questo comporta che il rumore, per essere riportato in ingresso, sia diviso per una minor sensibilità e così rispetti la specifica sul suo valore massimo nella regione dove esso è minore, cioè a grandi fattori di qualità; fattori di qualità più elevati consentiranno, poi, maggiori mismatch, mentre fattori di qualità più bassi richiederanno mismatch più ridotti. Rispetto a sHape e LIBRA il punto di lavoro è più lontano dal più vicino punto della regione di rispetto delle specifiche; sarebbe necessario ridurre il mismatch e avere un fattore di qualità superiore a 1800.

Errore di quadratura: definizione e origine

L'errore di quadratura è un errore nella lettura della velocità angolare dovuto all'accoppiamento diretto del moto di drive con quello di sense. Riferendosi a un z-gyro attuato in direzione x, idealmente il dispositivo attuato, ma non soggetto a velocità angolare dovrebbe avere un'uscita nulla. Tuttavia un moto in direzione y può insorgere a causa di basse tolleranze nel processo di fabbricazione che generano sbilanciamenti tra le molle, nella forza di attuazione o tra le masse mobili. Pochi sono i lavori in letteratura in cui si è cercato di prevedere tale errore; in uno dei più significativi la stessa struttura di giroscopio è stata simulata e poi disegnata inserendo volutamente imperfezioni per valutare l'entità dei diversi contributi all'errore di quadratura [17]. La distribuzione delle masse è stata resa asimmetrica, la forza di attuazione è stata sbilanciata cambiando il gap di parte dei comb fingers e le molle sono state rese asimmetriche cambiandone le larghezze. È emerso che la maggiore sorgente dell'errore di quadratura è l'asimmetria tra le molle, come riportato nella tabella sottostante. Basta che la larghezza delle molle cambi di solo $0.2\mu m$ che si rileva un errore di quadratura di $228^{\circ}/s$, che è circa il 10% del full scale ($2000^{\circ}/s$) dominante sulle altre sorgenti. Poiché la previsione è stata poi confermata da risultati sperimentali nel medesimo lavoro, si è deciso di utilizzare lo stesso metodo in questo progetto.

Quadrature source	Nominal Value	Errored Value	Quadrature Error ($^{\circ}/s$)	% FSR
Mass Imbalance	0	1/80	10	0.5
Force Imbalance	$2\mu m$	$2.2\mu m$	92.7	4.63
Spring Imbalance (Width)	$4\mu m$	$3.8\mu m$	228	11.4

Tabella 4.11: imperfezioni introdotte e loro esito.

L'accoppiamento elastico vede la generazione di una forza nella direzione di sense che è proporzionale allo spostamento x nella direzione di drive; tale forza presenta, dunque, uno sfasamento di $\pi/2$ rispetto alla forza di Coriolis, legata invece alla velocità della massa attuata, \dot{x} : per questa ragione si parla di errore di quadratura.

Effetti dell'errore di quadratura sui nostri giroscopi

Essendo l'errore di quadratura dovuto sostanzialmente al mismatch tra le molle, si è voluto eseguire delle simulazioni su strutture volutamente asimmetriche come larghezza delle molle. Nel decidere l'entità del mismatch da applicare alle molle ci si è riferiti alla tabella sottostante, che riporta, per diversi wafer (P04, P06, P08, P10) il valore medio dell'over etch e la deviazione standard relativi a errori del processo N&MEMS misurate su strutture precedentemente prodotte. Escluso il caso peggiore, non realistico, si è considerato il secondo caso più sfavorevole, evidenziato in tabella 4.12; si sono simulate strutture con una differenza tra le larghezze delle molle di $50nm (\cong 3 \cdot \sigma = 3 \cdot 13.4nm = 40.2nm)$.

Positioning	P04		P06		P08		P10	
L1:C5	116	6.16	66.5	4.13	78	4.68	79.7	5.36
L3:C5	59	2.82	14.6	4.2	32.7	4.17	40.1	9.01
L5:C5	34.9	4.36	-2.52	4.74	5.68	13.4	15	5.81
L7:C5	43.1	4.09	8.37	3.73	7.24	4.58	29.3	8.87
L9:C5	68.8	1.88	29.1	3.21	40.7	3.94	44.5	6.39
L5:C1	56.9	2.89	28.7	3.14	51.9	3.64	44.2	6.6
L5:C3	52.1	3.24	12.2	3.2	11.9	3.42	26.8	7.47
L5:C7	40.3	4.7	1.14	3.6	7.7	6.31	-8.61	58.4
L5:C9	79.8	5.97	21.4	6.62	41.8	4.59	36.1	4.28

Tabella 4.12: per i diversi wafers (uno per colonna), per ogni area si riporta valore medio e deviazione standard dell' over etch.

In particolare sono state fatte delle simulazioni degli effetti del mismatch tra le molle nello z-giroscopio LIBRA. È stato cercato il caso pessimo di mismatch tra molle cambiando prima quelle di drive (molle A), e poi anche quelle di sense (molle B). Nella prima colonna della tabella seguente, delle immagini indicano schematicamente il mismatch che è stato simulato. Molle mismatchate sono molle che differiscono in larghezza di $50nm$ e saranno, quindi, una più morbida ed una più rigida; sono indicate nelle immagini della tabella 4.13 secondo la legenda:



Nella seconda colonna, gli stress che i nanogauge sentono in assenza di rotazioni e, tra parentesi, lo stress differenziale, che, se non nullo, produce un segnale in uscita e, di conseguenza, il rilevamento di una data velocità angolare (in realtà non esistente), riportata nella terza colonna e riscritta come percentuale del full scale ($2000^{\circ}/s$) nella quarta colonna. Per non avere un dispositivo troppo complicato, e quindi impossibile da simulare, sono stati tolti i comb-fingers e sono state aggiunte delle masse alla massa esterna in modo simmetrico affinché, con la rimozione dei combs, non cambiasse la frequenza di risonanza. Il caso ideale, che vede assenza di mismatch, vede applicato lo stesso stress ad entrambi i nanogauge; esso è non nullo per la non idealità della struttura ma c'è uno stress differenziale nullo, e quindi un segnale in uscita nullo. I casi peggiori si sono rivelati essere il D ed il G: con tale disposizione del mismatch delle molle A più che con altre disposizioni le masse, quando attuate, tendono a ruotare nello stesso verso producendo, però, due effetti opposti sui due nanogauge, data la specularità della struttura. L'errore prodotto è circa dell' 1% del full scale: una percentuale accettabile, e ben inferiore al limite di zero rate level imposto dalle specifiche ($\pm 75^{\circ}/s$).

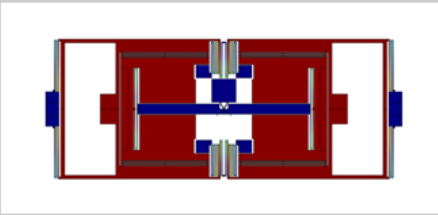
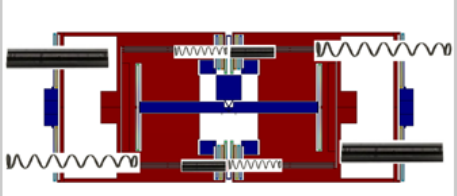
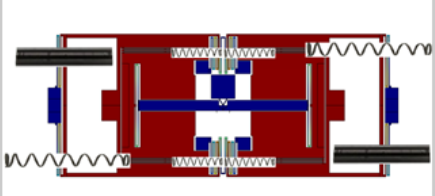
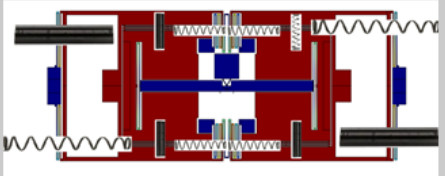
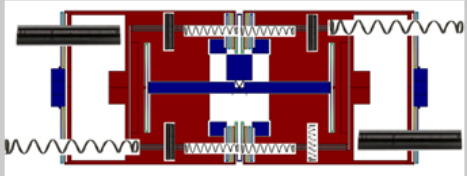
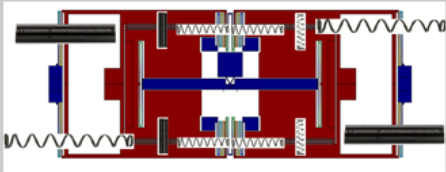
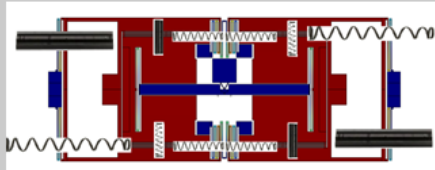
Spring conditions		$\Delta\sigma$ [MPa]	Zero rate level [°/s]	% FSR
A		1,85 1,85 (0)	0	0
B		1,9 2,02 (0,12)	1,36	0,068
C		1,1 2,9 (1,8)	20,45	1,02
D		0,95 3,00 (2,05)	23,29	1,16
E		1,1 2,8 (1,7)	19,31	0,96
F		1,1 2,9 (1,8)	20,45	1,02
G		0,95 3,00 (2,05)	23,29	1,16

Tabella 4.13: effetti delle varie imperfezioni introdotte.

Dove ε è la costante dielettrica, X lo spostamento nella direzione di drive, h l'altezza del processo, e y_0 il gap tra i piatti. La suddetta equazione vale per $y \ll y_0$, una condizione tipicamente soddisfatta. Il segno negativo indica che tale forza si oppone al moto in quadratura.

Capitolo 5 . Layout

Una volta disegnate le strutture e verificato il loro corretto funzionamento attraverso modellizzazioni e simulazioni del loro funzionamento, è stato disegnato con Cadence il loro layout nella prospettiva di una produzione di tali primi giroscopi. Di seguito, vengono mostrati i layout dei tre giroscopi.

Le regole di layout e i layers utilizzati sono quelli dettati dal flusso di processo di Leti. Si noti come tutte le masse mobili siano bucherellate: infatti per renderle libere di muoversi è necessario che venga rimosso l'ossido sottostante, che le tiene ancorate al substrato. Per questo sulla massa è disegnata una matrice di fori, attraverso i quali l'acido fluoridrico (HF) può raggiungere l'ossido e reagire con esso per eliminarlo. La distanza tra i fori è legata all'efficacia di tale reazione. In design successivi e più accurati dei giroscopi è necessario tener conto della presenza di tali fori, che comportano una riduzione della massa mobile in ragione della loro distanza reciproca, ed una conseguente variazione delle frequenze di risonanza.

sHape

In figura 5.1 si riporta il layout del z-gyro sHape.

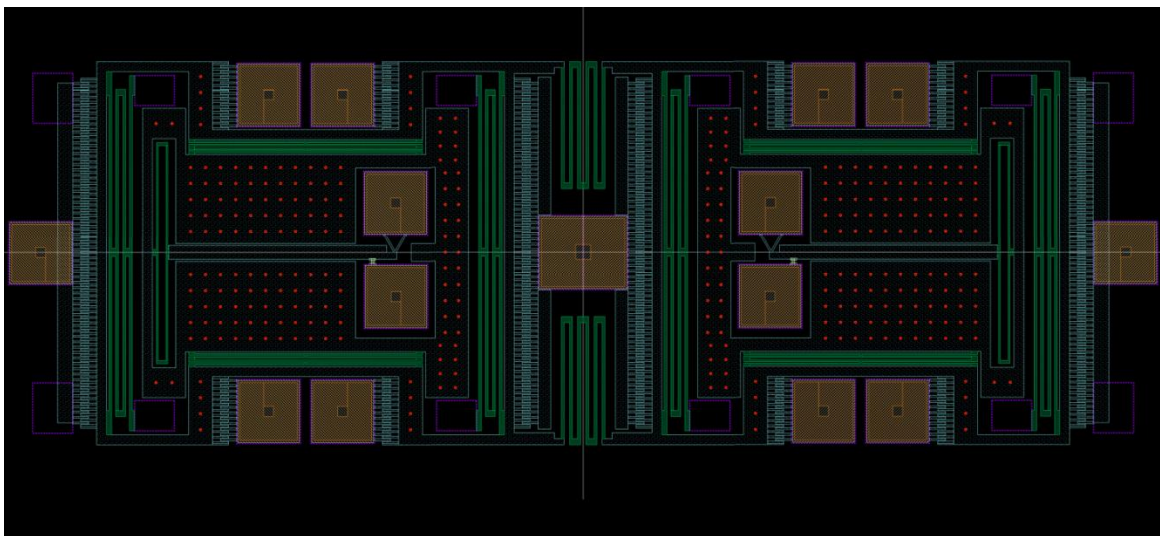


Figura 5.1: layout di sHape.

LIBRA

Figura 5.2 illustra il layout di LIBRA.

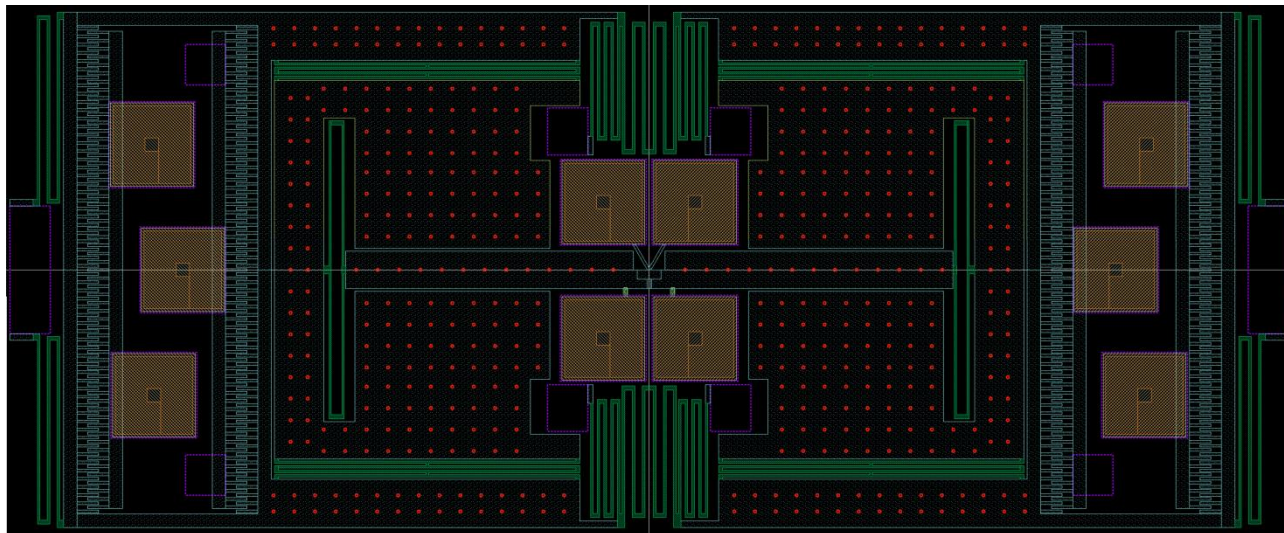


Figura 5.2: layout di LIBRA.

proXY

In figura 5.3 è rappresentato il layout del xy-gyro proXY.

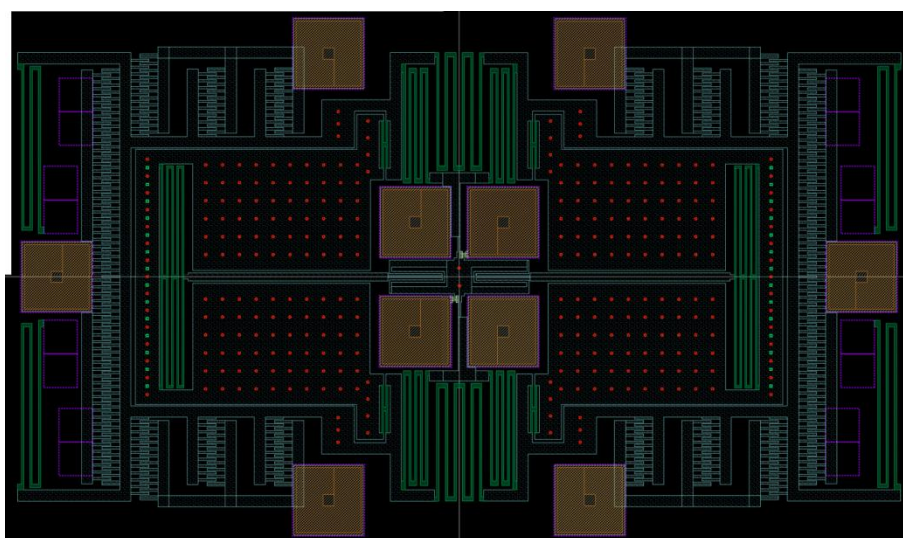


Figura 5.3: layout di proXY.

Capitolo 6 .Conclusioni

In seguito alle previsioni teoriche e di simulazione portate avanti in questa tesi, si può concludere che è in linea di principio possibile per i z-gyro ottenere prestazioni sono molto vicine alle specifiche. Non siamo nelle specifiche ma, come si discuterà a breve, sono state proposte diverse soluzioni per rientrarvi.

Considerato il caso dello sHape, fissati fattore di qualità e mismatch, cioè fissato il punto di lavoro, si è verificato che il semplice aumentare o diminuire della sensitività elettromeccanica del dispositivo (ad esempio attraverso l'aumento del fattore leva, la variazione del numero di celle di comb fingers o delle tensioni di attuazione) non permette comunque di entrare nella regione utile, come mostrato in figura 6.1.

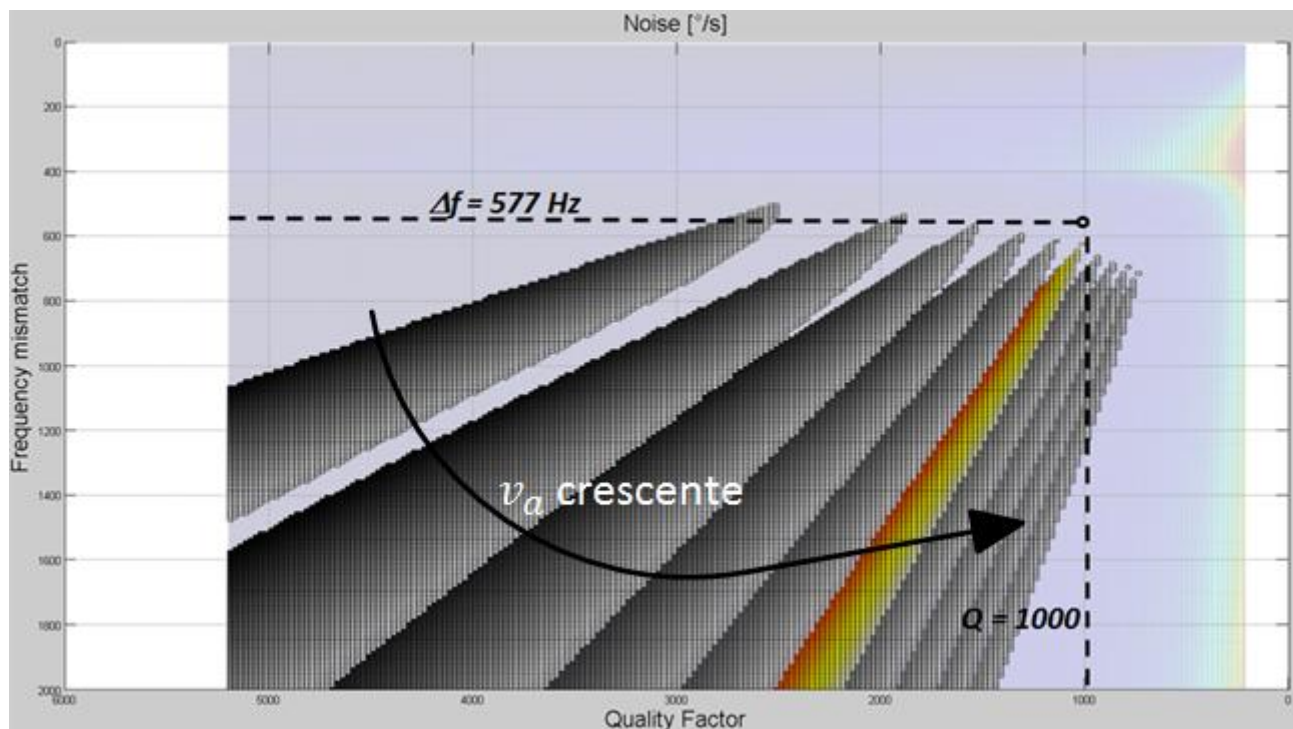


Figura 6.1: diverse regioni di interesse al variare della sensitività: regioni a Q minori corrispondono a maggiori sensitività.

Le varie regioni, qui rappresentate, si possono ottenere agendo sui vari parametri che compongono la sensitività; in particolare, dei parametri immediati da modificare, purché si rimanga entro i valori consentiti, sono quelli della polarizzazione in continua o in alternata. È possibile cambiare anche altri parametri agendo sulla struttura e mantenendo inalterati fattore di qualità e mismatch, ma è più complicato. Diminuzioni di v_a e, quindi, della sensitività elettromeccanica, comportano uno

spostamento della regione di interesse verso Q più alti, e viceversa aumentare la sensitività rende possibile avere fattori di qualità inferiori. Si nota come la regione colorata, ottenuta con i valori dei parametri dello sHape precedentemente elencati, sia la più vicina al punto di lavoro.

Un primo possibile miglioramento consiste in un aumento del fattore di qualità, per esempio fino al valore di 2000, ottenuto attraverso una diminuzione della pressione del package. Questo comporterebbe un aumento della sensitività di un fattore 2, ben oltre il limite imposto dalle specifiche; così insieme all'aumento del fattore di qualità una possibilità è la riduzione di uno stesso fattore della tensione di polarizzazione in continua, nel nostro caso passando da $V_b = 15V$ a $V_b = 7.5V$; in aggiunta si è scelto di ridurre ulteriormente il valore di $v_{a,0}$ da $740mV$ a $650mV$. Il risultato è quello mostrato in figura 6.2.

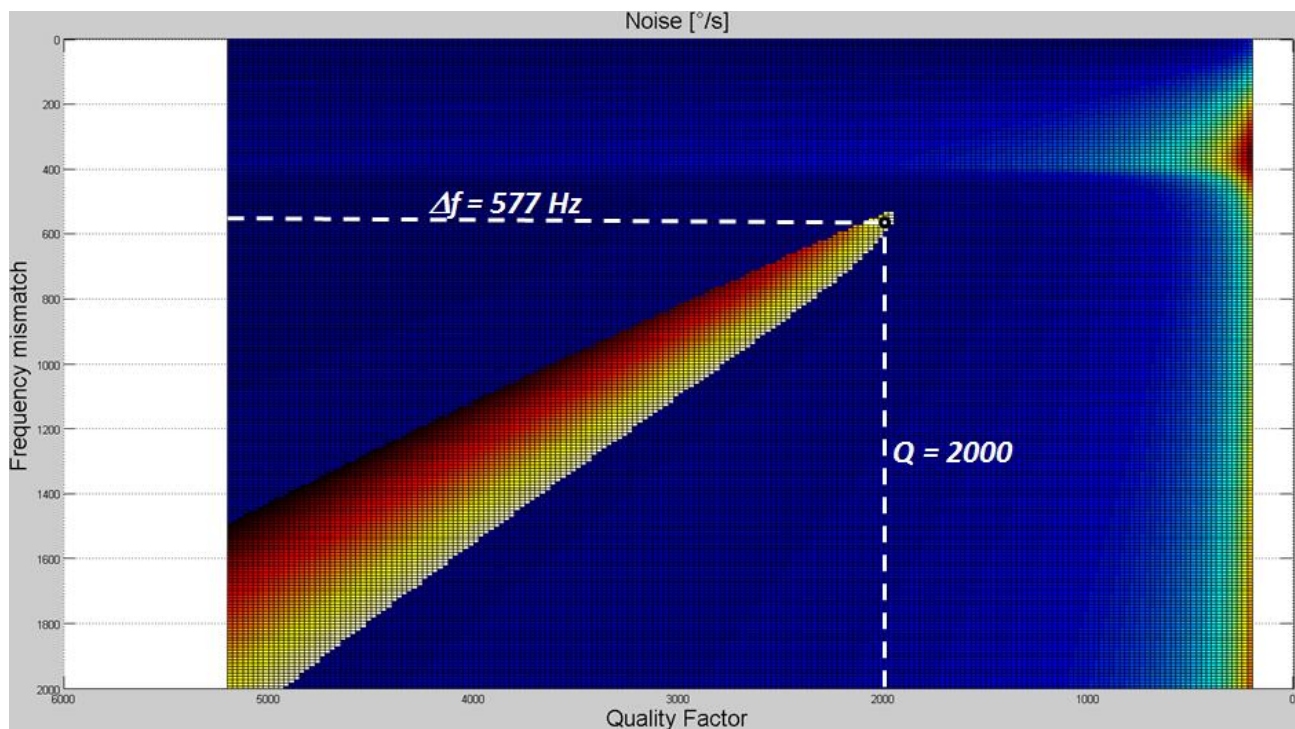


Figura 6.2: il punto di lavoro di sHape soddisfa le specifiche, avendo raddoppiato Q e dimezzato V_b .

Il punto di lavoro soddisferebbe, ora, le specifiche.

Insieme ad un aumento del fattore di qualità, una seconda possibilità per mantenere pressoché inalterata la sensitività è l'aumento del mismatch: esso è stato fatto passare, apportando adeguate modifiche alla struttura, da $\Delta f = 577Hz$ a $\Delta f = 1635Hz$. Si ricorda, infatti, che lo spostamento della massa di Coriolis, fatte le opportune semplificazioni, è

$$\Delta y_s = \frac{\Omega}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{b_D} \cdot \frac{F_D}{f_s \Delta f}$$

Dove F_D è la forza di drive, Ω la velocità angolare, b_D il fattore di smorzamento per il sistema di drive, f_s la frequenza di risonanza per il sistema di sense, e Δf il mismatch tra i modi di drive e sense. Il risultato è mostrato in figura 6.3.

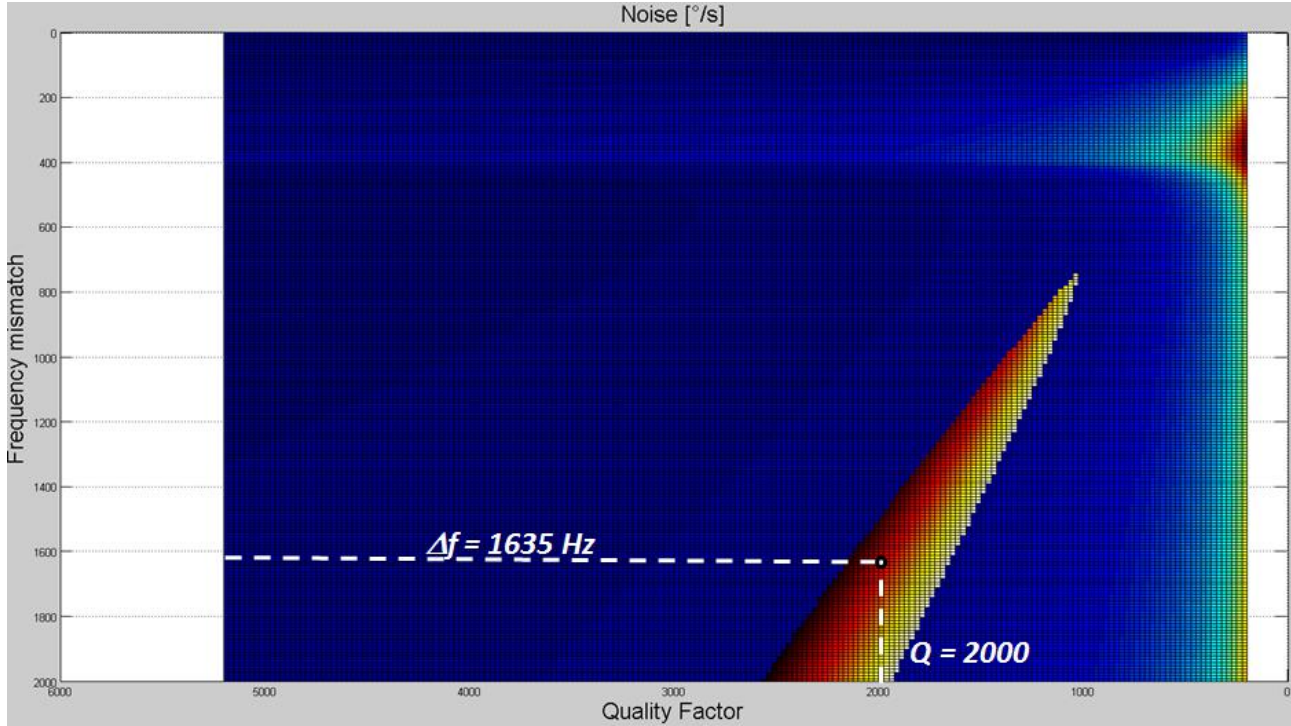


Figura 6.3: il punto di lavoro di sHape soddisfa le specifiche, avendo aumentato il mismatch e raddoppiato il Q .

Per quanto riguarda il giroscopio xy, esso ha una sensibilità minore di quella degli z-gyro di circa un fattore 3. In questo caso, fissato il punto di lavoro, è efficace un aumento della sensibilità, per esempio portando il valore del gap dei comb fingers da $g = 1.1\mu m$ a $g = 0.75\mu m$. Come mostrato in figura 6.4, con la nuova sensibilità il punto di lavoro è molto più vicino al punto ottimo.

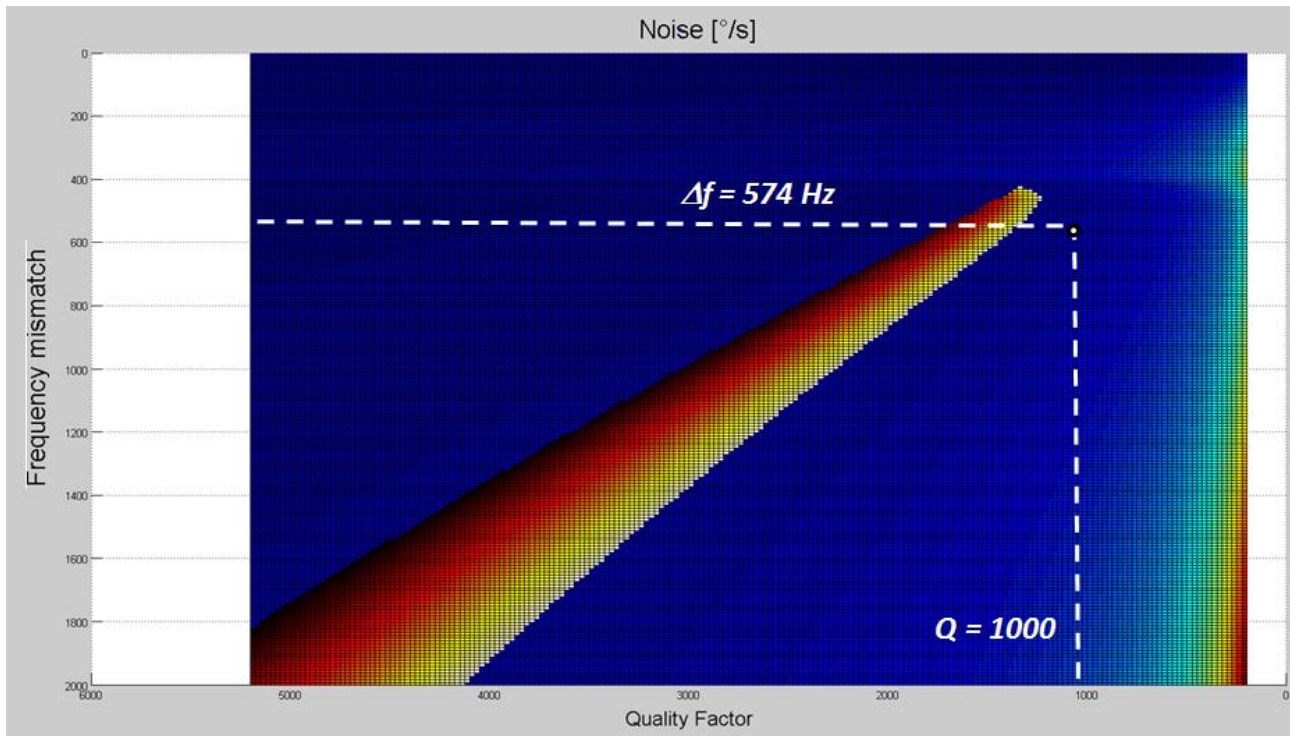


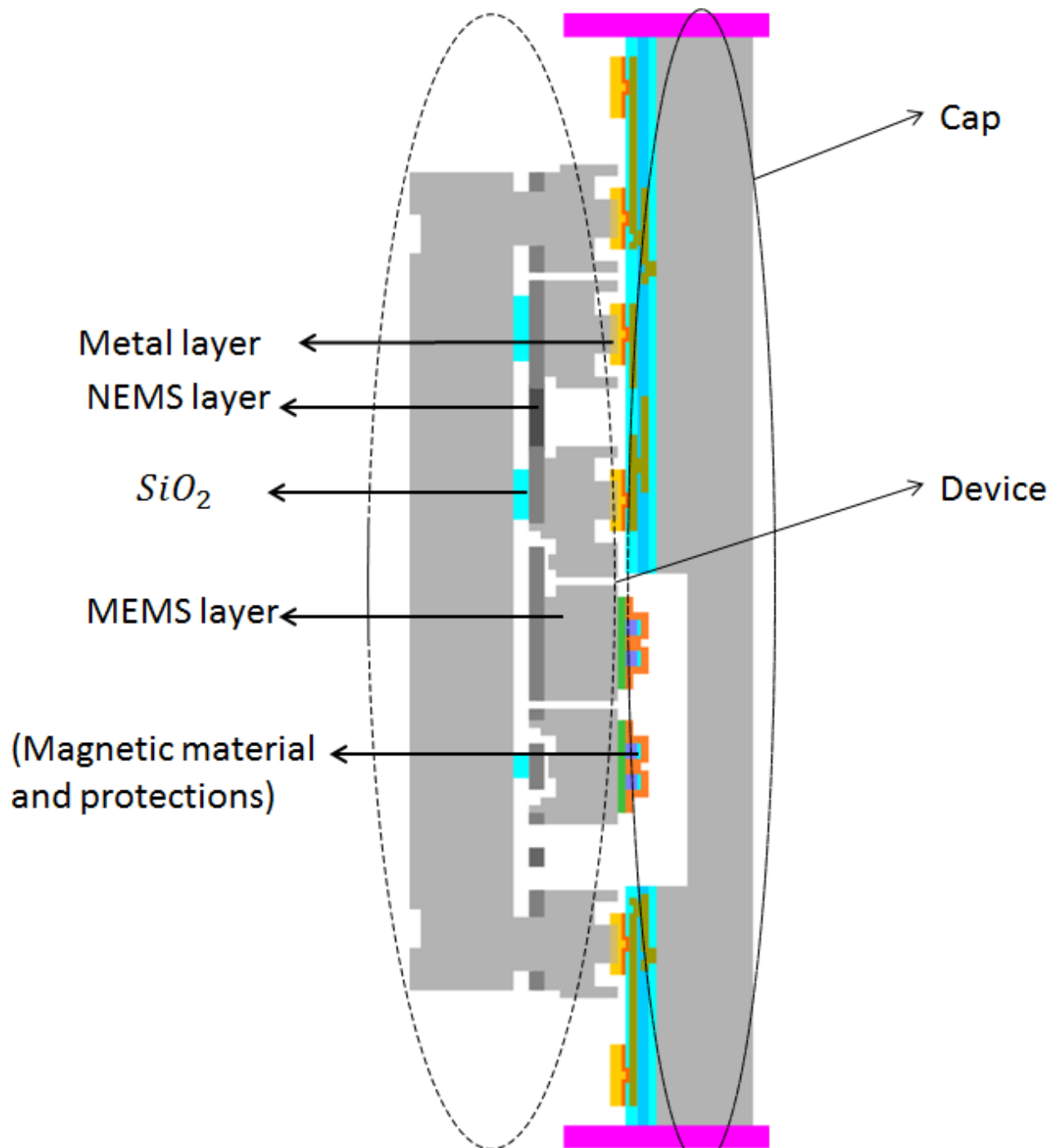
Figura 6.4: il nuovo punto di lavoro di proXY, avendo essendo passati da $g = 1.1\mu m$ a $g = 0.75\mu m$.

Per proXY non si riesce a migliorare il fattore leva se non alzando il processo: questo è dovuto al fatto che la lunghezza del secondo braccio (la distanza tra il fulcro della leva e la testa del nanogauge) non si può progettare arbitrariamente, ma è sempre pari alla metà dell'altezza del processo. Saranno, quindi, valutate le performances della stessa struttura realizzata, però, con un'altezza di processo doppia, $h = 30\mu m$, che comporta anche una sensibilità raddoppiata.

Capitolo 7 . Appendici

Appendice A: Flusso di processo Leti

Di seguito si riporta il risultato del flusso di processo N/MEMS di Leti: la novità consiste principalmente nel metodo utilizzato per produrre i nanogauges, di dimensioni troppo ridotte per poter essere realizzati con un metodo tradizionale.



Appendice B: andamenti di rumore e S/N

È stato scritto un codice matlab (Matlab 7.0) per la modellizzazione di giroscopi a due frames con lettura basata su leva e nanogauge. Esso prende in ingresso i parametri caratteristici del giroscopio e genera l'andamento del rumore e del rapporto S/N al variare di mismatch, ottenuti facendo variare la frequenza di drive, e fattore di qualità di drive e sense. Dato un certo mismatch, la variazione dei fattori di qualità avviene grazie ad una variazione della pressione del package; ipotizzare che $Q_S = Q_D$ significa assumere ragionevolmente che i fattori di smorzamento di drive e sense variano nello stesso modo con la pressione.

```
clear all
close all
clc

% Physical Data

kb=1.38e-23;      % J/K const Boltzmann
T=300;           % K
e=8.85e-12;      % [F/m]

% Polimi Solution

Lov=8e-6;
% gap=1.5e-6;    % [m] valore shape
gap=1.1e-6;      % valore proxy e libra
h=15e-6;         % [m]
% Ncell=82;      % [m]valore shape
Ncell=59;        % [m]valore proxy e libra
Ag=(250e-9)^2;   % [m^2] sezione nanogauge
Lg=5e-6;         % [m^2] lunghezza nanogauge
% Gamma=0.063;   % spostamento X nano gauge/spostamento Z valore
shape
% Gamma=0.094;   % spostamento X nano gauge/spostamento Z valore
libra
```

```

Gamma=0.015;      % spostamento X nano gauge/spostamento Z valore
proxy

% ms=1.7e-9;      % Massa Sense valore shape
% mtot=2.76e-9; % Massa Totale valore shape
% ms=1.66e-9;    % Massa Sense valore libra
% mtot=3.13e-9; % Massa Totale valore libra
ms=1.54e-9;      % Massa Sense valore proxy
mtot=2.78e-9;    % Massa Totale valore proxy

% wd=20040*2*pi;% [rad/s] freq ris drive valore shape
% ws=20550*2*pi;% [rad/s] freq ris sense valore shape
% wd=18407*2*pi;% [rad/s] freq ris drive valore libra
% ws=18984*2*pi;% [rad/s] freq ris sense valore libra
wd=18355*2*pi;   % [rad/s] freq ris drive valore proxy
ws=18858*2*pi;   % [rad/s] freq ris sense valore proxy

% kd=40.06;      % [N/m] valore shape
% ks=21.95;      % [N/m] valore shape
% kd=38.46;      % [N/m] valore libra
% ks=27.77;      % [N/m] valore libra
kd=30.3;         % [N/m] valore proxy
ks=18.55;        % [N/m] valore proxy

Qs=1000;         % fatt qualità sense
Qd=1000;         % fatt qualità drive
rho=4e-1;        % [ohm/m] resistività nano
R=2e3;           % [ohm] resistenza nano
Vw=0.2;          % [V] V wheatstone
alpha=4e-5;

N=3e25;          % [m^-3] densità di droganti
Dw=(ws-wd)/2/pi;% banda
E=169e9;         % modulo di Young
PF=45/E;

```



```
% Driving Voltages
```

```
Vp=15; % V
```

```
va=870e-3; % V
```

```
Fd=2*e*h*Ncell*Vp*va/gap;
```

```
% Forza di drive
```

```
xd=Fd/kd*Qd;
```

```
% spostamento
```

```
direzione drive
```

```
Qseff=1/(sqrt((1-(wd/ws)^2)^2+(wd/Qs/ws)^2));
```

```
% FDT
```

```
yng=2*ms*xd*wd*2*pi/360*Qseff/ks*Gamma;
```

```
% Spostamento
```

```
del ng [m/°/s]
```

```
Sens=2*ms*xd*wd*2*pi/360*Qseff/ks*Gamma*E/Lg;
```

```
% [Pa/(°/s)]
```

```
Df_max=2000;
```

```
% mismatch
```

```
massimo in frequenza
```

```
step_f=10;
```

```
% passo in
```

```
frequenza
```

```
Q_min=200;
```

```
% Q minimo
```

```
Q_max=5000;
```

```
% Q massimo
```

```
step_Q=25;
```

```
% passo per Q
```

```
W_fil=400;
```

```
% Larghezza
```

```
filtro
```

```
%ciclo per la generazione del rumore in funzione di Df e Q
```

```

    for i=1:(Df_max/step_f+1) % sweep in
frequenza Df
        wd=(20550-step_f*(i-1))*2*pi;
        ws=20550*2*pi;

        % ricalcolo le grandezze

        kd=(wd)^2*mtot; % cambio la sola
kd
        Dw(i)=(ws-wd)/2/pi;

        for k=1:(Q_max/step_Q+1) % Sweep per Q
            puls_d(i,k)=wd;
            Qs=Q_min+(k-1)*step_Q;
            Qd(k)=Q_min+(k-1)*step_Q;

            xd=Fd/kd*Qd(k);
            x_drive_plot(i,k)=xd;
            Qseff(i,k)=1/(sqrt((1-(wd/ws)^2)^2+(wd/Qs/ws)^2));
            yng=2*ms*xd*wd*2*pi/360*Qseff/ks*Gamma;

Sens(i,k)=2*ms*xd*wd*2*pi/360*Qseff(i,k)/ks*Gamma*E/Lg;
            Sens_inversa(i,k)=Sens(i,k)^-1;
            b=ws*ms/Qs;

        % larghezza del filtro rettangolare
            f_fil=(wd-W_fil*2*pi : 2*pi : wd+W_fil*2*pi);
        % FDT nella sola parte del filtro rettangolare
            HS_fil=1./(sqrt((1-
(f_fil./ws).^2+(f_fil./Qs/ws).^2)));
            Sensex_fil=2*ms*xd*wd*2*pi/360/ks*Gamma*E/Lg.*HS_fil;

        %calcolo dei rumori nella zona del filtro rettangolare

```

```

    % [Pa^2/Hz]: faccio anche la matrice del rumore tot in
    % uscita: Noise_tot(i,k)

% rumore bianco

    Ss_fil=4*kb*T*b/(2*ms*wd*xd)^2/(2*pi)^2*360^2;
    S_fil=Ss_fil*ones(1,length(f_fil));
    Sbrown_fil=S_fil.*Sensex_fil.^2;

% rumore Johnson

Sjohn_fil=4*kb*T*R.*(E/45).^2/(0.2)^2.*ones(1,length(f_fil));

% rumore 1/f

    S1_f_fil=alpha/4/N/Lg/Ag./f_fil/PF^2;

% rumore tot [Pa^2/Hz]

    Stot_fil=Sbrown_fil+Sjohn_fil+S1_f_fil;

% rumore integrato [Pa^2]

    Noise_tot(i,k)=sum(Stot_fil)*2*pi;

% rumore tot in ingresso [°/s]

    Noise_gradi(i,k)=sqrt(Noise_tot(i,k))/Sens(i,k);

% rumore massimo da specifiche integrato sul filtro rettangolare
diviso fra elettronica e meccanico

    Noise_max = (0.015*sqrt(W_fil))/sqrt(2);

```

```

%controlli

    if Sens(i,k) <= 50000                                &&
sqrt(Noise_tot(i,k))/Sens(i,k) <= Noise_max
        Noise_gradi1(i,k) = sqrt(Noise_tot(i,k))/Sens(i,k);
    else Noise_gradi1(i,k) = 0;
    end

% rapporto segnale rumore [Pa/Pa]

SN(i,k) = 2*ms*xd*wd*2000/360*2*pi*Qseff(i,k)/ks*Gamma*E/Lg/sqrt(Noise_tot(i,k));

    if Sens(i,k) <= 50000                                &&
sqrt(Noise_tot(i,k))/Sens(i,k) <= Noise_max
        SN1(i,k) = SN(i,k);
    else SN1(i,k) = 0;
    end
end

figure(3); % Rumore totale in ingersso [°/s]
axes3 = axes('Parent', figure(3));
view(axes3, [136 50]);
hold on;
grid on;
surf(Qd, Dw, Noise_gradi);
colormap('cool')

minplaneimg = min(Noise_gradi1(Noise_gradi1~=0));

```

```

scaledimg = (floor(((Noise_gradi1 - minplaneimg) ./
(max(max(Noise_gradi1)) - minplaneimg)) * 255));
colorimg = ind2rgb(scaledimg,hot(256));

surf(Qd,Dw,(Noise_gradi1./Noise_gradi1.*Noise_gradi1),colorimg,'facecolor','texture');

figure(4); % S/N
axes4 = axes('Parent', figure(4));
view(axes4,[136 50]);
hold on;
grid on;
surf(Qd,Dw,20*log10(SN));
colormap('cool')

minplaneimg = min(20*log10(SN1(SN1~=0)));
scaledimg = (floor(((20*log10(SN1) - minplaneimg) ./
(max(max(20*log10(SN1))) - minplaneimg)) * 255));
colorimg = ind2rgb(scaledimg,hot(256));
surf(Qd,Dw,20*log10(SN1./SN1.*SN),colorimg,'facecolor','texture');

```

Osservando l'andamento del rumore riportato in ingresso si è desiderato verificar che il gradino presente a un mismatch pari alla larghezza del filtro realmente fosse dovuto all'operazione del rumore nelle frequenze attorno alla frequenza di drive. Così al codice appena riportato sono state aggiunte le righe seguenti, in cui si fa calcolare a matlab l'integrale (attraverso il comando: `int`) di $Q_{S,eff}$ in un intervallo largo 800 Hz ($= 2 \times W_{fill}$) centrato su diverse frequenze.

```

%Verifica della correttezza del gradino di rumore: considero
%l'integrazione di un rettangolo largo 2x500Hz moltiplicato per
HS

fs=20550;
Qs=3000;

```

```

syms f;

HS=1/(sqrt((1-(f/fs)^2)^2+(f/Qs/fs)^2));

%costruisco il vettore che contiene i vari integrali di HS con
centro del
%rettangolo che va da 20550, indietro; come si fa per wd, che
parte da
%20550 e va indietro

indice_area=0;
for p=0:2:800
    indice_area=indice_area+1
    area_HS(indice_area)=int(HS,f, fs-W_fil-p, fs+W_fil-p)
    p_vett(indice_area)=p;
end
figure(11);
plot(p_vett,area_HS);

```

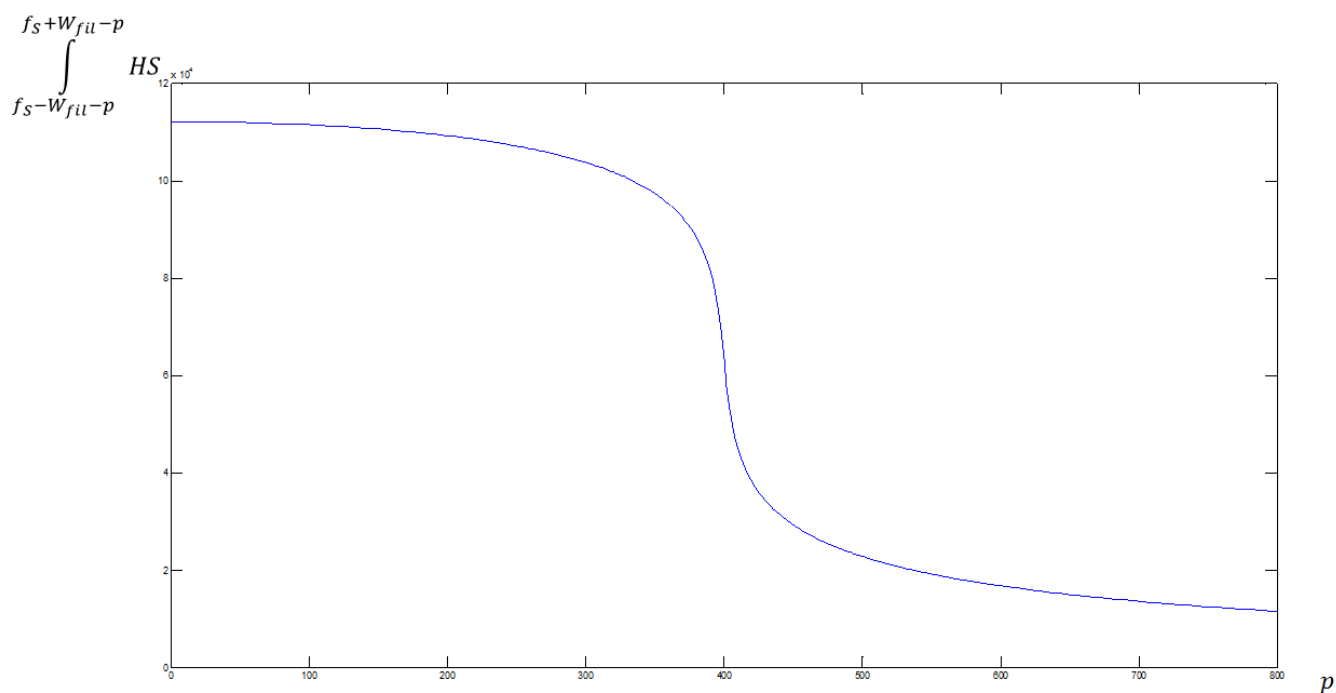


Figura 7.1: andamento dell'integrale della funzione $Q_{s,eff}$: il “crollo” avviene integrando solo metà del picco.

La figura qui riportata mostra come in corrispondenza di $p = 400$, cioè quando si integra metà del picco di $Q_{s,eff}$, si abbia il “crollo” dell'andamento. L'entità di tale andamento è paragonabile a quella del rumore, anche per il fattore di differenza tra i valori prima del gradino e quelli dopo.

È stato scritto anche un codice per la generazione di un'interfaccia con le stesse funzionalità del file .m appena riportato, ma più user friendly. Essa è rappresentata nelle figure sottostanti. Attraverso opportune caselle di testo si possono inserire i parametri caratteristici dl giroscopio, e si possono generare gli andamenti di rumore e S/N in una vista 3D e in una vista dall'alto che permetta di comprendere meglio il luogo dei punti di lavoro. Sono, inoltre, visibili le densità spettrali dei tre rumori, in uscita dal dispositivo e riportati in ingresso. Attraverso opportuni bottoni, tutte le immagini generate sono disponibili anche in una nuova finestra (come accade per una qualsiasi immagine generata con un codice matlab).

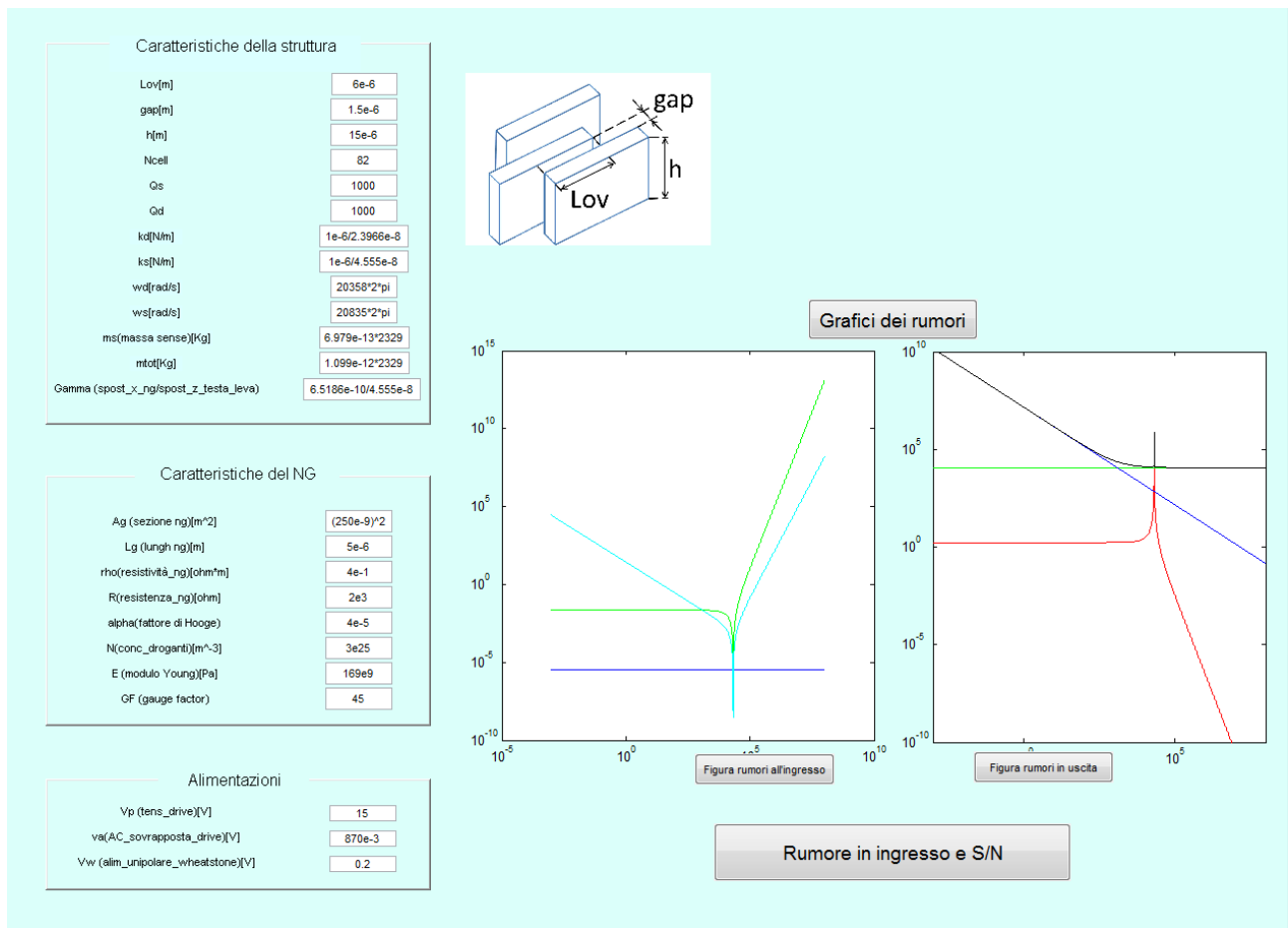


Figura 7.2: schermata iniziale dell'interfaccia.

La schermata iniziale è quella rappresentata in figura 7.2; il pulsante “Rumore in ingresso e S/N” permette di aprire la seconda schermata, in figura 7.3. Attraverso quest’ultima è possibile visualizzare i due grafici di rumore e S/N, avendo inserito i dati necessari.

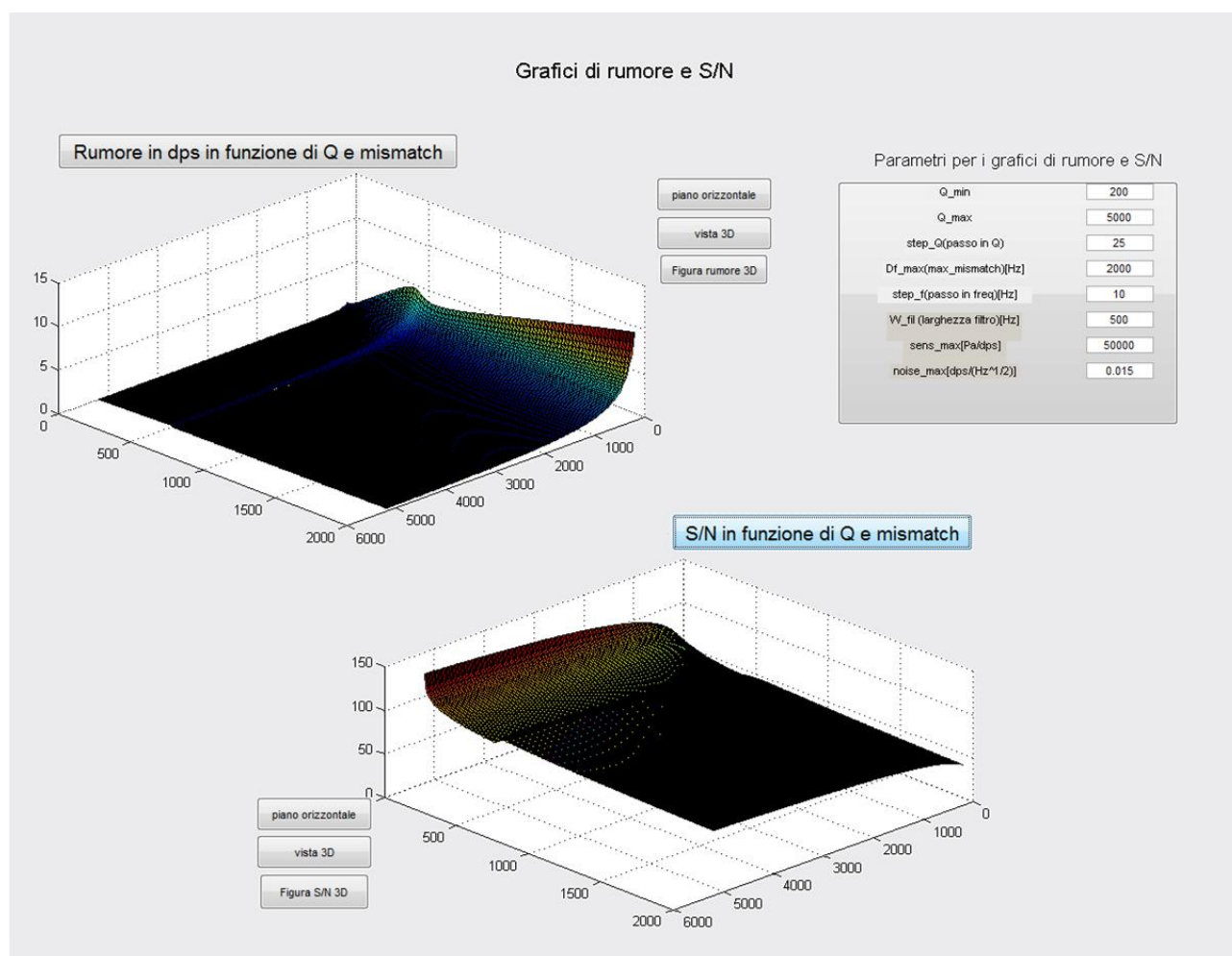
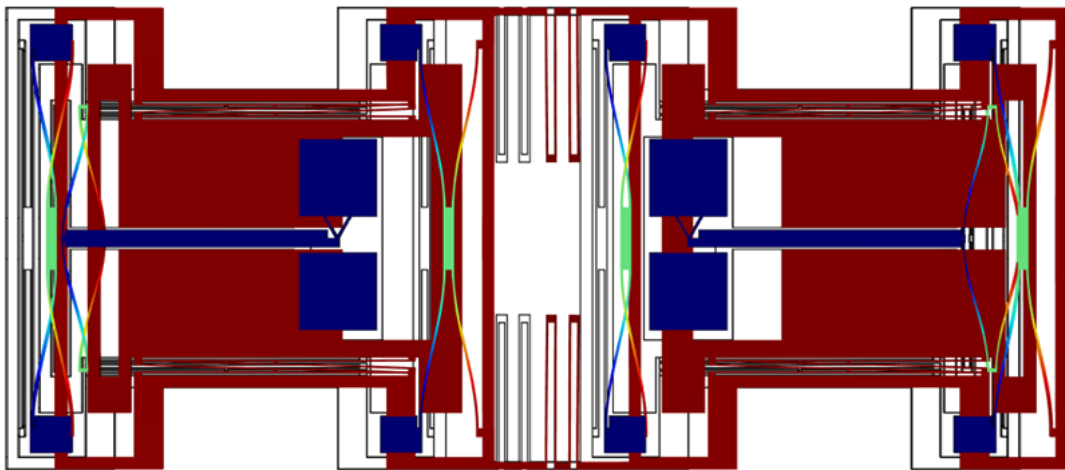


Figura 7.3: seconda schermata dell'interfaccia.

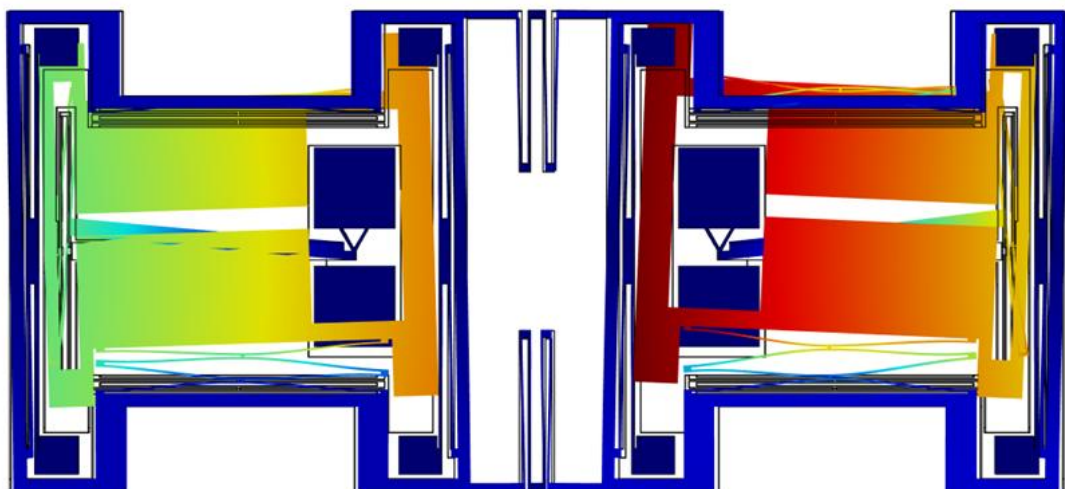
Appendice C: modi di ordine superiore

Per le tre strutture progettate i modi interessanti ai fini del funzionamento sono quelli in antifase di drive e sense; esistono, però, un modo a frequenze inferiori, che è di drive ma in fase, e diversi modi a frequenze superiori. Uno dei criteri per valutare la bontà di una struttura è la distanza in frequenza dei modi di drive e sense da tali modi indesiderati, che non devono essere eccitati durante il funzionamento. Si riportano qui di seguito alcuni dei modi indesiderati dei tre giroscopi.

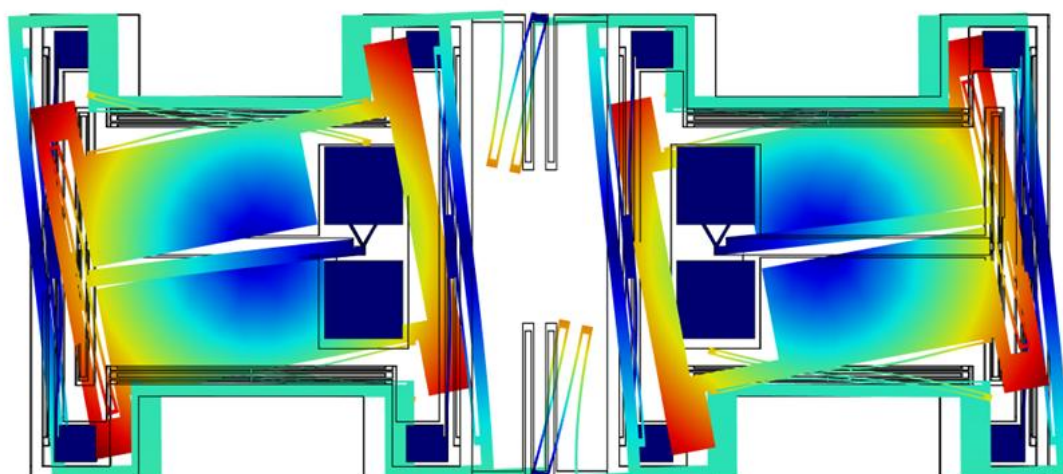
- sHape



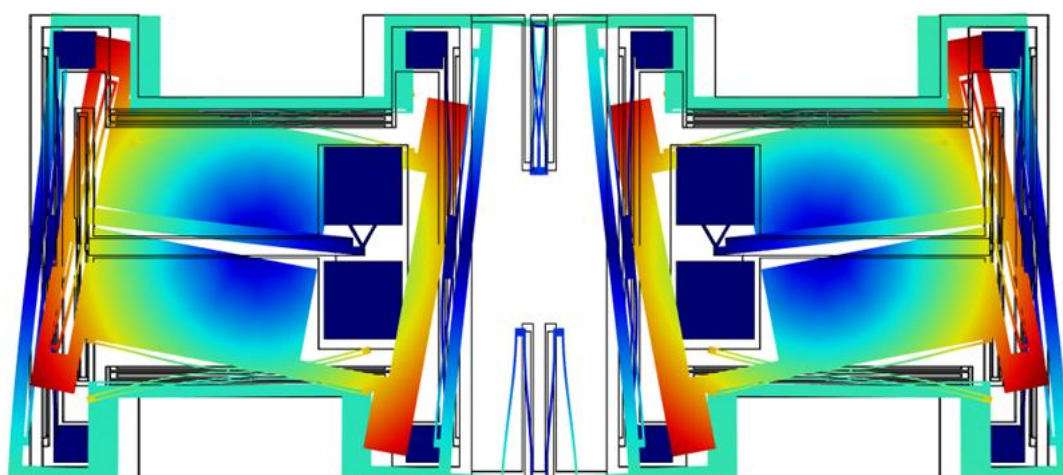
$$f = 15,324 \text{ KHz}$$



$$f = 18,851 \text{ KHz}$$



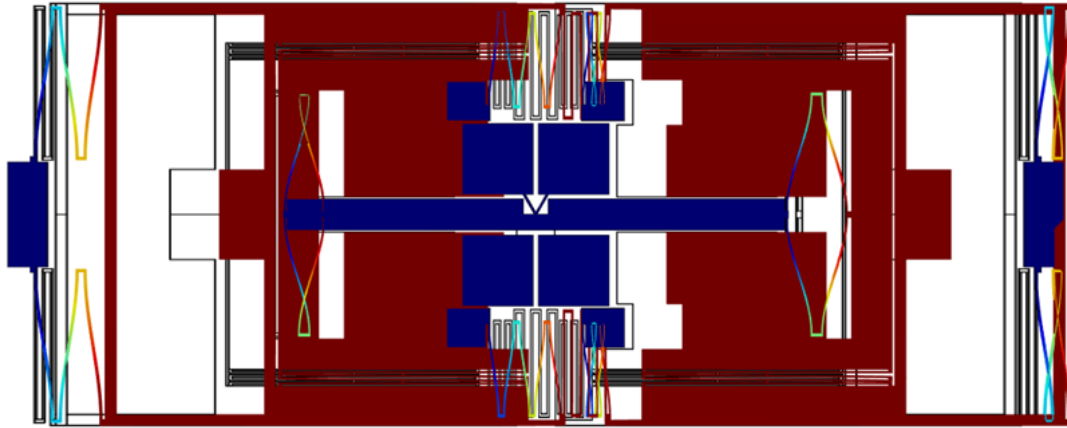
$$f = 44,013 \text{ KHz}$$



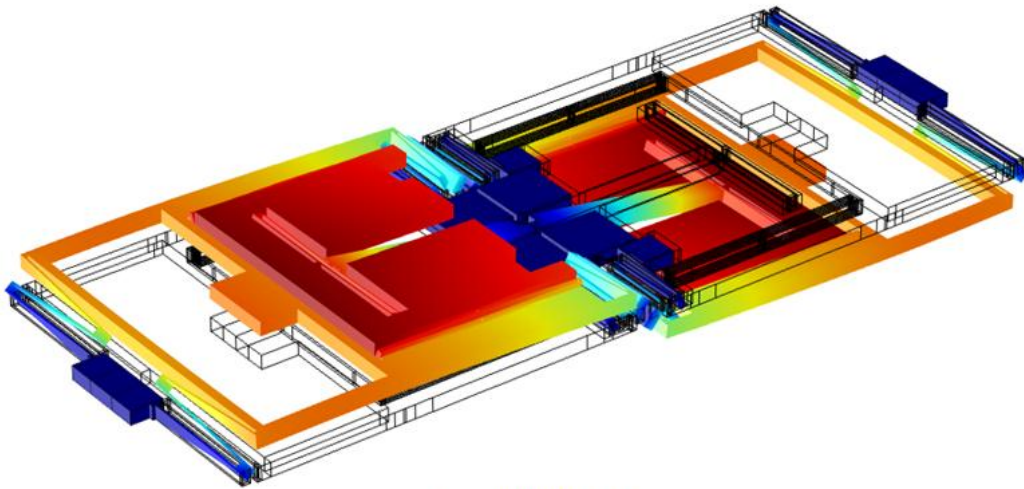
$$f = 44,384 \text{ KHz}$$

Il modo di drive in fase è evitato grazie alle opportune tensioni di attuazione delle masse. Si nota come il moto in fase delle masse di sense sia a frequenze molto vicine a quelle di drive e sense; d'altra parte, data l'attuazione in antifase del giroscopio, è impossibile che questo modo venga eccitato, dato che, in presenza di una velocità angolare, le due masse vedranno due forze di Coriolis uguali ed opposte. Gli altri modi sono a frequenze superiori ai 40 KHz e sono torsionali (quindi difficili da eccitare).

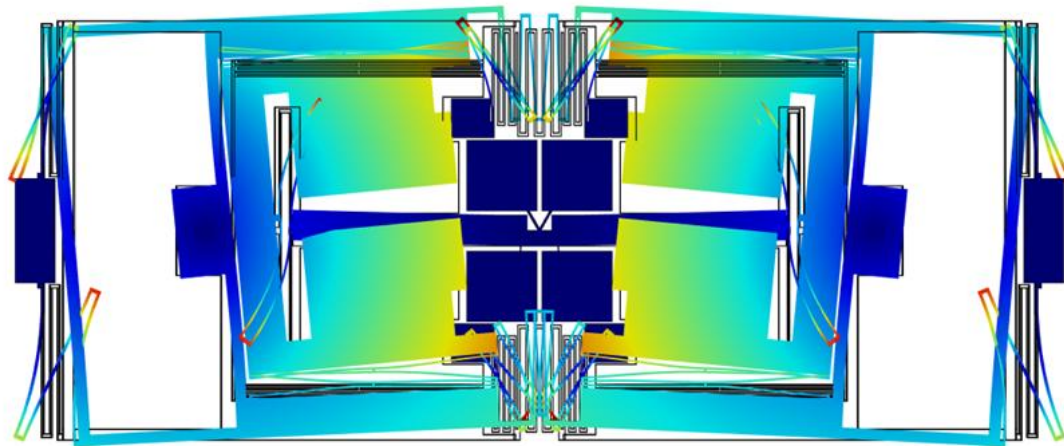
- LIBRA



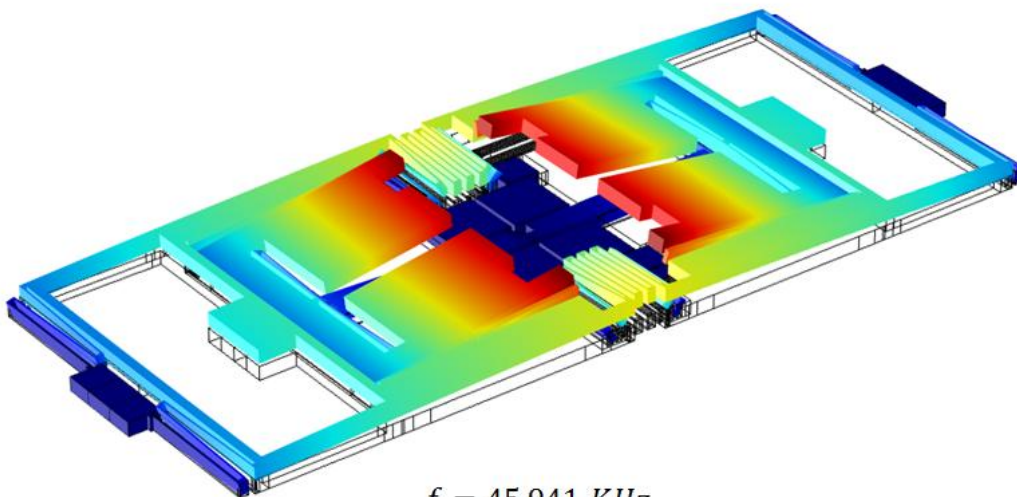
$$f = 13,994 \text{ KHz}$$



$$f = 42,879 \text{ KHz}$$



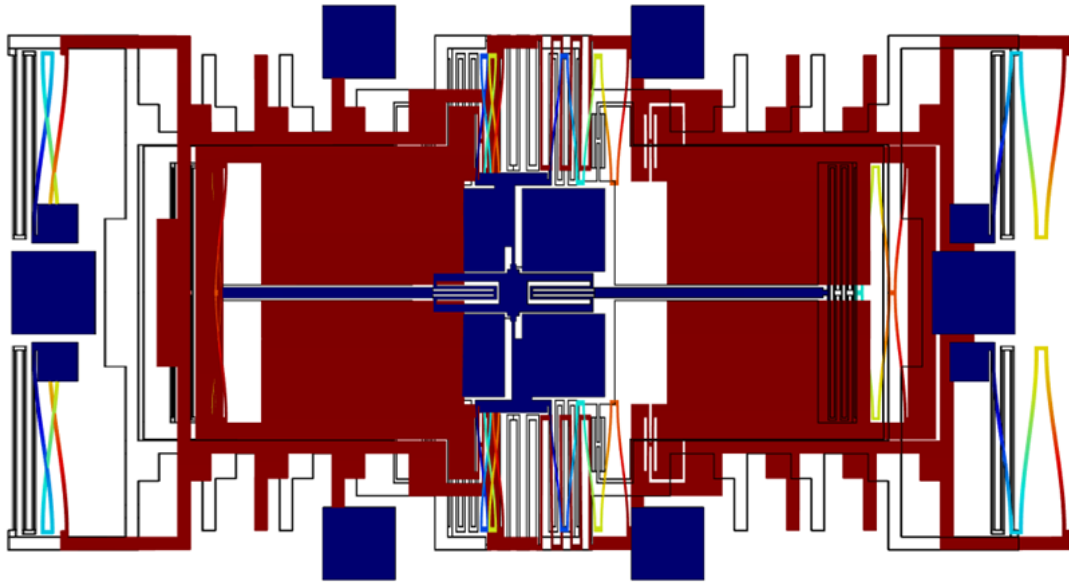
$$f = 44,961 \text{ KHz}$$



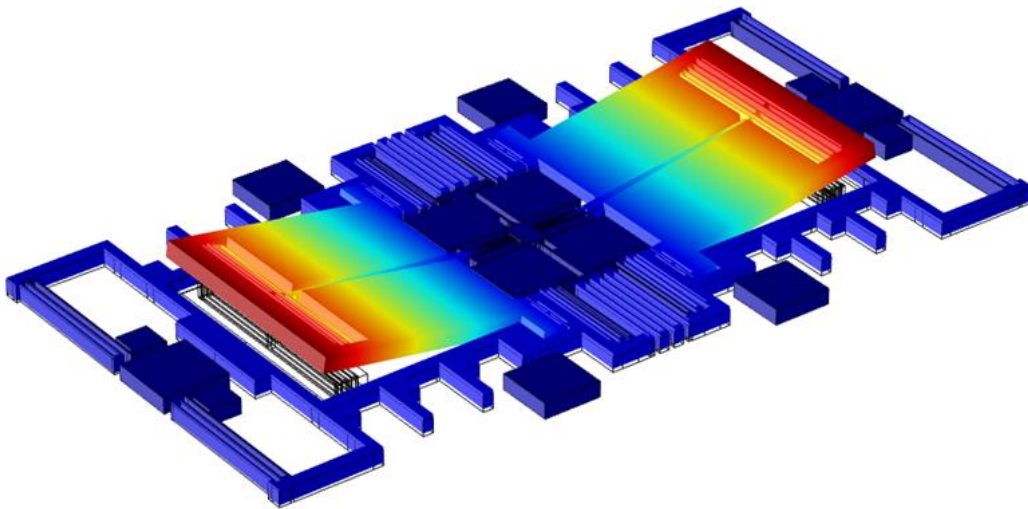
$$f = 45,941 \text{ KHz}$$

Si nota come non possa esistere, grazie alla leva unica, un modo di sense in fase. A parte il modo di drive in fase, che non può essere eccitato per via di una tensione di attuazione sinusoidale alla frequenza di drive in antifase, si nota come questa struttura presenti modi ad alta frequenza, e come questi modi spesso non producano uno stress sul nanogauge. La favorevole distribuzione dei modi indesiderati è una delle ragioni che la rende preferibile allo sHape.

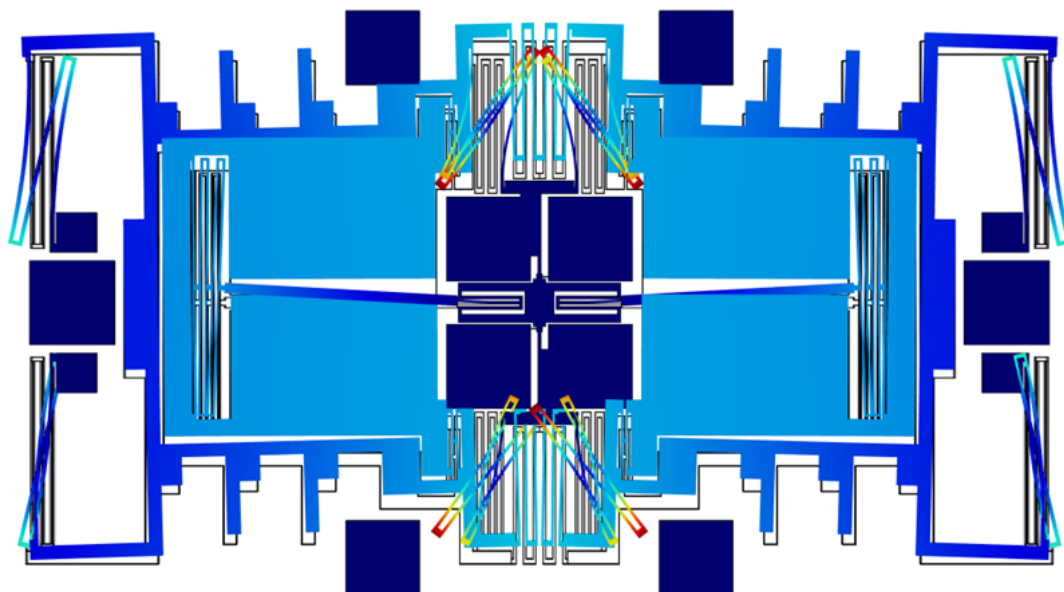
- proXY



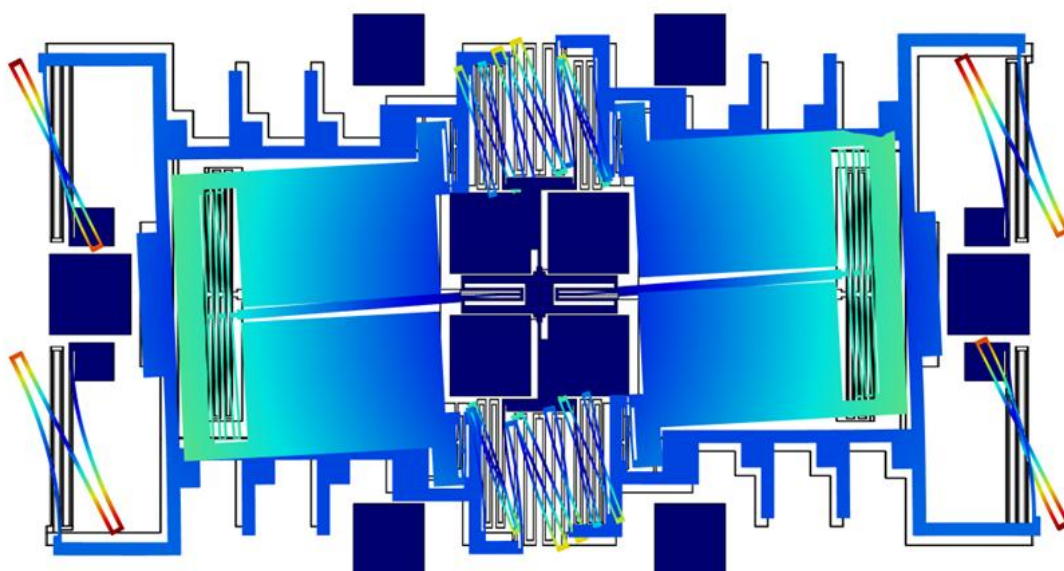
$f = 12,974 \text{ KHz}$



$f = 26,072 \text{ KHz}$



$$f = 42,960 \text{ KHz}$$



$$f = 48,624 \text{ KHz}$$

Ancora una volta, i modi di sense e di drive in fase non verrà mai eccitato; esso è, inoltre, a frequenze abbastanza superiori rispetto ai modi interessanti. Gli altri modi sono soprattutto torsionali e ad alta frequenza.

Bibliografia

- [1] Ajit Sharma, Mohammad Faisal Zaman, Farrokh Ayazi, “A sub-0.2°/hr Bias Drift Micromechanical Silicon Gyroscope With Automatic CMOS Mode-Matching”.
- [2] John A. Geen, Steven J. Sherman, John F. Chang, Stephen R. Lewis, “Single-Chip Surface Micromachined Integrated Gyroscope With 50°/hr Allan Deviation”.
- [3] Reinhard Neul, Udo-Martin Gómez, Kersten Kehr, Wolfram Bauer, Johannes Classen, Christian Doring, Ermin Esch, Siegbert Gotz, Jorg Hauer, Burkhardt Kuhlmann, Chrisoph Lang, Michael Veith, Rainer Willig, “Micromachined Angular Rate Sensors for Automotive Applications”.
- [4] Said Emre Alper, Taifun Akin, “A Single-Crystal Silicon Symmetrical and Decoupled MEMS Gyroscope on an Insulating Substrate”.
- [5] S. Timoshenko, “Vibration problems in engineering”, pp 30.
- [6] Fedder, “MEMS Gyroscope Theory and Design. *Tutorial*”, *IEEE International Frequency Control Symposium*.
- [7] Giacomo Langfelder, Antonio Longoni, Federico Zaraga, “Low-noise real-time measurement of the position of movable structures in MEMS”.
- [8] Ajit Sharma, Mohammad Faisal Zaman, Farrokh Ayazi, “A sub-0.2°/hr Bias Drift Micromechanical Silicon Gyroscope With Automatic CMOS Mode-Matching”.
- [9] Marc S. Weinberg, Anthony Kourepenis, “Error Sources in In-Plane Silicon Tuning-Fork MEMS Gyroscopes”.
- [10] Hung Yao-Hung, Dou Ru Chang, Wen-Pin Shih, “Design and Simulation of a CMOS-MEMS Gyroscope with a Low-Noise Sensing Circuit”.
- [11] Zhong Yang Guo, Long Tao Lin, Qian Cheng Zhao, ZhenChuan Yang, Huikai Xie, Gui Zhen Yan, “A Lateral-Axis Microelectromechanical Tuning-Fork Gyroscope With Decoupled Comb Drive Operating at Atmospheric Pressure ”.
- [12] Ajit Sharma, Mohammad Faisal Zaman, Farrokh Ayazi, “A 104-dB Dynamic Range Transimpedance-Based CMOS ASIC for Tuning Fork Microgyroscopes”.
- [13] Ph. Robert, V. Nguyen, S. Hentz, L. Duraffourg, G. Jourdan, J. Arcamone and S. Harrisson, “M&NEMS : A new approach for ultra-low cost 3D inertial sensor”.

- [14] Jean-Philippe Polizzi, Laurent Duraffourg, Eric Ollier, Julien Arcamone and Philippe Robert,” Nano Electro Mechanical Devices for Physical and Chemical Sensing”.
- [15] James M. Gere, Barry J. Goodno, “Mechanics of materials”.
- [16] A. Walther, M. Savoye, G. Jourdan, P. Renaux, F. Souchon, P. Robert, C. Le Blanc, N. Delorme, O. Gigan, C. Lejuste, “3-axis Gyroscope With Si Nanogage Piezo-Resistive Detection”.
- [17] Tatar, Alper, Akin, “Effect of quadrature error on the performance of a fully-decoupled MEMS gyroscope”.
- [18] Qin Shi, Shourong Wang, Anping Qiu, Yshen Xu, Xunsheng Ji, “Design principle of Suspension of MEMS Gyroscope”.
- [19] R. Antonello, R. Oboe, L. Prandi, C. Caminada, F. Biganzoli, “Open Loop Compensation of the Quadrature Error in MEMS Vibrating Gyroscopes”.
- [20] Bao Y. Yeh, Yung C. Liang, “Modelling and Compensation of Quadrature Error for Silicon MEMS Microgyroscope”.
- [21] E. Tatar, S. E. Alper, T. Akin , “Quadrature-Error Compensation and Corresponding Effects on the Performance of Fully Decoupled MEMS Gyroscopes”.

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro di tesi desidero innanzitutto ringraziare il professor Longoni, che un anno fa, vedendomi comparire nel suo ufficio vagamente interessato di MEMS, mi ha proposto un lavoro che ora posso dire essere davvero quello che avrei voluto, e che nei mesi mi ha permesso di imparare capacità tecniche e critiche. Grazie alle sue osservazioni, è stato interessante notare come mai si debba perdere la prospettiva generale per poter svolgere un lavoro realmente consapevole, e anche molto più gustoso.

Ringrazio Giacomo Langfelder per la continua attenzione al mio lavoro, dal tracciare la linea da seguire, all'entrare nel merito dei particolari. Lo ringrazio, poi, per avermi aiutato, insieme al prof. Longoni, a correggere la tesi, con una gratuità che supera la semplice dedizione al proprio lavoro. Infine, lo ringrazio per la sua amicizia fresca e simpatica.

Voglio poi ringraziare Stefano Dellea, il venerabile maestro di Comsol che mi ha insegnato la sua arte, e che pazienza ha avuto?! Prendete questi due botta e risposta: 1. “Ciao Ste cosa hai fatto oggi? (Le prime volte mi spiegava cosa facevano e io prendevo appunti, intanto prendevo dimestichezza con Comsol)” “Ciao Fede tutto bene? Oggi abbiamo fatto....[*5 minuti di spiegazione intensa e piena di astuti barbatrucchi da software*]... quindi così tutto torna, capito? Abbiamo trovato la posizione ottima del nanogauge”. ”No Ste scusa perché viene così? ” “Dunque..perché...[*altri 5 minuti*]...ok?” “Sì ma, non ho capito questo punto qui...” Ora, sono le 17.50, c'è il treno da prendere, voi cosa fareste dopo aver perso tre diottrie perché avete dovuto cambiare la larghezza delle molle quattro volte (credetemi, dovete essere dei cecchini) e due litri di sudore perché il laboratorio è un forno (credetemi, dovete essere dei piranha[per chi non lo sapesse, {almeno, mia sorella non lo sa} amano le acque calde])? Se siete buoni, rispiegate un po' di corsa, se no rimandate al giorno dopo; se, invece, vi chiamate Stefano Dellea vi tirate un po' su gli occhiali col dito, e con nervi di ferro ricominciate a spiegare, con calma “Dunque...”, tutti i passaggi. Tu-tti. 2. “Ste porca miseria come si fa a specchiare la struttura? ” “Dunque.. facilissimo Fede, devi fare così [*clic, clic*]” “Ammazza, era una cavolata! Ok” Dopo mezz'ora, cerca che ti ricerca, dov'è che aveva cliccato cacchio?! (Tra l'altro sto elaborando una teoria per cui i pulsanti di Comsol cambiano continuamente posizione, e possono anche scomparire, come le scale della scuola di Harry Potter.. Hogwarts forse si chiamava... Ste?? Com'è che si chiamava? “Dunque...”). Va beh non riesco ad andare avanti, glielo richiedo “Ste scusa ma non mi ricordo dove avevi cliccato” “Figurati, devi fare clic dx e poi mirror” “Grandioso”. Dopo due giorni.. mmm ora devo specchiare,

ah sì clic dx qui, e poi qua. Arg! Cosa fa 'sto -----?! “Ste scusa ma me la specchia, però non mantiene la struttura originaria..” “Dunque -mi prende il mouse- po po po (quando è troppo facile canticchia motivetti), [*clic cli-clic*] e qui devi cliccare su <keep input objects>” “Aaaaa te capi?”. Insomma, mi ha proprio seguito in tutto, con un'amicizia davvero gradevole.

Si ringraziano tutti i professori, dottorandi, ricercatori e tesisti del terzo piano dell'edificio di via Golgi 40, per aver reso il laboratorio un ambiente piacevole, un esempio. Matlab, solito errore che non si capisce che cosa bisogna fare (poi scopri che stai moltiplicando N_{cell} per *plot(...)*... giàh), dietro di te, misure a raggi X (boh), all'improvviso senti “Non c'è, misura più bella di teeee” sulle note di “Più bella cosa” di Ramazzotti..... va beh. Oppure: solite misure a raggi X (fanno male e si vede), silenzio tombale in laboratorio, ma la misura non viene. Ad un certo punto uno se ne esce “Expecto Patronum!!!” (l'ho cercata su internet, incantesimo magico di Harry Potter)... ma perché? Uno si chiede. Forse voleva far venire la misura, o forse solo far lievitare il monitor... così... Ma mi sa che a queste domande neanche lo Stefano Dellea può rispondere. Comunque non è che i problemi si risolvono, però si guarda tutto da una prospettiva più ampia.

Voglio ringraziare la mia famiglia, sì sono quelli che ci hanno messo i soldi e che mi hanno sempre chiesto passo passo come va, però c'è di più. Un bene grande, una compagnia grande.

Ripensando a questi anni, la cosa che mi fa più dispiacere guardare sono le volte in cui uno spera che finisca presto, senza concentrarsi su quello che c'è. Per questo voglio ringraziare i miei amici, che sono coloro che invece mi fanno vedere il loro sguardo attento sulle cose e sulle persone. Con loro, è più facile essere consapevoli di una promessa presente. In laboratorio, in treno, per strada. Oggi, alle undici, all'una, alle sei, alle dieci; domani, alle tre, alle quattro.

Federico Giacci

