



Università degli studi di Padova
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di laurea Triennale in
Meccanica e Meccatronica
curriculum Meccatronica

Analisi della tecnologia e delle principali applicazioni MEMS in ambito sensing

RELATORE: PROF. SONA ALESSANDRO

LAUREANDO: CHIRCIU ADRIAN STEFAN

ANNO ACCADEMICO: 2015/2016

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE | 1 |
| CAPITOLO 1 – Tecnologia di fabbricazione dei MEMS | 3 |
| 1. Bulk micromachining..... | 3 |
| 1.1. Wet isotropic etching | 3 |
| 1.1.1. Attacco isotropico | 4 |
| 1.2. Wet anisotropic etching | 5 |
| 1.3. Plasma isotropic etching..... | 7 |
| 1.3.1. Reactive Ion Etching | 7 |
| 1.4. Etch-stop techniques | 8 |
| 1.4.1. Doping selective etching | 8 |
| 1.4.2. Bias Dependent Etching | 8 |
| 1.4.2.1. Corrente di fuga | 10 |
| 1.4.2.2. Sistemi di ancoraggio | 10 |
| 2. Surface micromachining..... | 10 |
| 2.1. Stiction | 12 |
| 2.2. Tecnologie di microfabbricazione | 12 |
| 2.2.1. Silicon on insulator surface micromachining..... | 12 |
| 2.2.2. HEXSIL | 13 |
| 2.2.3. LIGA..... | 14 |
| 3. Bonding techniques..... | 14 |

| | |
|---|----|
| CAPITOLO 2 – Sensori Inerziali | 17 |
| 1.Importanza dei sensori inerziali MEMS | 17 |
| 1.1.Optical Image Stabilization | 17 |
| 1.2.Local Based Services | 17 |
| 2.Sistema elettromeccanico massa-molla-smorzatore | 18 |
| 3.Interfaccia sensore e misure di energia..... | 21 |
| 3.1.Figura di merito | 21 |
| 4.Accelerometro..... | 23 |
| 4.1.Configurazione massa-molla-smorzatore | 23 |
| 4.2.Tipologie di accelerometri | 27 |
| 4.2.1.Accelerometri piezoresistivi | 27 |
| 4.2.2.Accelerometri a effetto tunnel | 27 |
| 4.2.3.Accelerometri risonanti | 28 |
| 4.2.4.Accelerometri termici | 28 |
| 4.2.5.Accelerometri capacitivi | 29 |
| 5.Giroscopio..... | 31 |
| 5.1.Giroscopi vibranti | 32 |
| 5.1.1.Giroscopi inerziali MEMS traslazionali | 32 |
| 5.1.2.Giroscopi inerziali MEMS rotazionali | 33 |
| CAPITOLO 3 – Sensori di Forza | 37 |
| 1.Tecniche di trasduzione | 37 |
| 1.1.Estensimetro | 38 |
| 1.2.Trasduzione elettrostatica | 38 |
| 1.3.Trasduzione piezoelettrica | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 1.4.Trasduzione ottica | 39 |
| 1.4.1.Effetto Tunnel | 39 |
| 2.Sensori di Forza | 39 |
| 2.1.Sensore di forza a doppio range di misura | 40 |
| 2.2.Trasduzione capacitiva | 45 |
| 2.2.1.Comb drive laterale | 45 |
| 2.3.Metodi di lettura | 46 |
| CAPITOLO 4 –RF MEMS | 49 |
| 1.Definizione | 49 |
| 2.RF MEMS switch | 49 |
| 2.1.RF MEMS switch elettrostatico | 49 |
| 2.1.1.RF MEMS switch capacitivo | 50 |
| 2.1.2.RF MEMS switch ohmico | 51 |
| 3.Sistema massa-molla-smorzatore | 51 |
| 3.1.Circuito serie RLC | 52 |
| 3.2.Modello RF | 54 |
| 4.Risonatori RF MEMS oscillanti | 56 |
| 4.1.Modello elettromeccanico | 57 |
| CAPITOLO 5 –Biomems | 61 |
| 1.Biomems | 61 |
| 1.1.Microsistemi chirurgici..... | 61 |
| 1.2.Microsistemi diagnostici..... | 61 |
| 1.3.Microsistemi terapeutici | 62 |

| | |
|--|----|
| CAPITOLO 6 –Applicazioni notevoli | 63 |
| 1.Mercato dei dispositivi MEMS | 63 |
| 2.Classi di dispositivi MEMS | 64 |
| 2.1.Dispositivi fluidi | 65 |
| 2.1.1.Testine delle cartucce | 65 |
| 2.1.2.Calibro di Pirani | 66 |
| 2.1.3.Sensore di flusso..... | 66 |
| 2.2.Dispositivi ottici | 67 |
| 2.2.1.Proiettore di luce digitale | 67 |
| 2.2.2.Lenti liquide a focalizzazione variabile | 68 |
| 2.2.3.Specchio adattivo | 69 |
| 2.3.Dispositivi RF..... | 69 |
| 2.3.1.Sonde neurali | 69 |
| 2.3.2.Dispositivi di immagazzinamento dati | 70 |
| 2.4.Dispositivi inerziali | 70 |
| CONCLUSIONI | 71 |
| BIBLIOGRAFIA | 73 |

INTRODUZIONE

Le origini della tecnologia nota oggi sotto l'acronimo MEMS, abbreviazione di “micro-electro-mechanical-system”, possono essere datate nella prima metà degli anni '50; quando un articolo pubblicato sulla rivista *Physical Review*, per la prima volta, descrisse gli effetti di sensibilità alla tensione di materiali, come silicio e germanio, cosiddetti piezoresistenti. [1]

Con il termine MEMS ci si riferisce generalmente alla categoria dei dispositivi, di dimensioni caratteristiche inferiori al millimetro, realizzati mediante integrazione di elementi meccanici, sensori, attuatori e sistemi elettronici su un comune *wafer* di silicio attraverso l'impiego di tecniche di microfabbricazione.

In questo sistema ogni componente svolge una ben definita funzionalità. I sensori hanno il compito di produrre un'uscita dipendente da una variabile fisica da cui è interessato, grandezza d'interesse, secondo una legge fissata. L'elettronica integrata è adibita, sotto forma di rete logica analogica e digitale, a funzionalità di processamento o elaborazione in output di dati in input, espressi sotto forma di segnali elettrici e provenienti dai sensori. In seguito invia i segnali di comando agli attuatori per il loro pilotaggio affinché questi effettuino delle azioni, come movimentazioni, regolazioni e filtraggi, che vanno a incidere sul mondo esterno a seconda dei fini prefissati. [a]

La tecnologia MEMS è, quindi, l'insieme di tutte le tecniche di produzione che consentono l'integrazione, su un comune substrato di silicio, di un complesso sistema micro-elettromeccanico costituito da parti meccaniche, sensori, attuatori e da un' opportuna circuiteria elettronica.

L'obiettivo di questo elaborato è affrontare le principali tecnologie di fabbricazione dei dispositivi MEMS e analizzare, attraverso degli esempi, i settori fondamentali in cui possono essere impiegati. L'elaborato è suddiviso principalmente in due parti:

1. nella prima parte si esaminano le tecniche basilari necessarie per lavorare un dispositivo MEMS. Inoltre, si individuano anche i pregi e i difetti di ogni tecnologia, che possono rendere una tecnica adatta a una tipologia di applicazione piuttosto che a un'altra;
2. nella seconda parte si analizzano le principali applicazioni impiegate in ambito sensing. Sono state individuate 5 tipologie di sensori, in cui la tecnologia MEMS è

particolarmente utilizzata, ossia sensori inerziali, di forza, RF e BioMEMS. Per ogni tipologia è stato dedicato un capitolo, strutturato a sua volta in due parti: nella prima si analizzano le caratteristiche generali del sensore, mentre nella seconda parte si affronta un esempio di dispositivo. Esente da questa struttura è l'ultimo capitolo, in cui ci si è concentrati, invece, sul mercato di questi dispositivi e su un breve elenco delle principali applicazioni.

CAPITOLO 1

Tecnologia di fabbricazione dei MEMS

Le principali tecniche di realizzazione dei dispositivi MEMS sono:

- *bulk micromachining*,
- *surface micromachining*.

1.BULK MICROMACHINING

Con il termine *bulk micromachining* si indica la tecnologia di microfabbricazione, in cui le microstrutture sono realizzate attraverso la deposizione e rimozione selettiva di materiale internamente a un substrato (bulk) di un *wafer*¹ di silicio monocristallino. Questo processo è contraddistinto dal metodo di incisione del silicio, noto come *etching*, mediante il quale viene rimosso il materiale in eccesso, necessario per la realizzazione della struttura desiderata.

Esistono diverse tecniche di *etching* tra cui le più importanti sono:

- wet isotropic etching,
- wet anisotropic etching,
- plasma isotropic etching,
- etch stop techniques.

Si analizzano separatamente ognuna delle varie tecniche sopra elencate. [1] [2]

1.1.Wet isotropic etching

E' un processo chimico basato sulla rimozione di materiale in eccesso, in seguito a una reazione chimica tra le sostanze attaccanti e il materiale stesso. A seconda della direzionalità dell'attacco, della velocità di incisione nelle direzioni complanari alla superficie iniziale e della velocità nella direzione a essa ortogonale si hanno diversi tipi di attacco e profilo finale (figura 1.1):

- l'attacco isotropico determina un profilo arrotondato e si ottiene nel caso in cui le

¹ Wafer: è una sottile fetta di materiale semiconduttore sulla quale vengono costruiti circuiti integrati attraverso drogaggio, deposizione di sottili strati di materiali conduttori, semiconduttori, solidi e la loro incisione fotolitografica. [b]

velocità d'incisione sono uguali;

- l'attacco anisotropo determina un profilo a V o U e si ottiene nel caso in cui la velocità nella direzione ortogonale alla superficie iniziale d'attacco è maggiore rispetto a quella complanare;
- l'attacco verticale determina un profilo a pareti verticali e si ottiene in presenza di velocità in direzione complanare nulla.

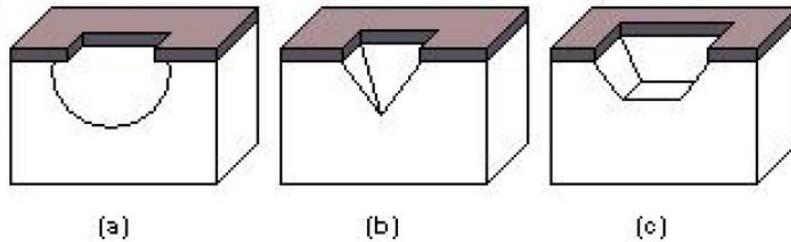


Figura 1.1 Profili di incisione nel caso di attacco isotropico (a) e attacco anisotropico (b), (c)

1.1.1. Attacco isotropico

Nel caso di attacco isotropico, *wet isotropic etching*, gli agenti attaccanti sono sostanze acide, come le miscele di acido nitrico (HNO_3) e acido fluoridrico (HF) diluite in acqua (H_2O) oppure in acido acetico (CH_3COOH).

Il processo di attacco si articola in tre fasi:

1. trasporto per diffusione dei reagenti alla superficie d'attacco,
2. reazione chimica tra agenti attaccanti e materiale,
3. allontanamento per diffusione dei prodotti di reazione dalla superficie attaccata.

Il meccanismo generale di attacco per un singolo cristallo di silicio si può riassumere in quattro passi :

1. iniezione di lacune nel silicio per formare ioni Si^{2+} o Si^+ ;
2. attaccamento dei gruppi ossidrilici OH^- a Si^{2+} per creare $Si(OH)_2^{2+}$;
3. reazione tra il silicio *idrato* e un agente complessante² nella soluzione;
4. scioglimento dei prodotti della reazione nella soluzione.

² Un complesso è un composto chimico in cui un atomo lega un numero di altre specie chimiche superiore al suo numero di ossidazione.

Si nota che per questo tipo di attacco è necessaria una fonte di lacune OH^- e agenti complessanti, che dovranno essere opportunamente dosati. Inoltre, osserviamo che l'incisione isotropica è fondamentalmente un meccanismo di trasferimento di carica. La velocità di incisione risulta essere dipendente dal tipo e dalla concentrazione di impurità droganti presenti nel materiale da asportare. La velocità di attacco del *bulk* di silicio dipende principalmente dalla temperatura e dalla concentrazione di droganti, ovvero di piccole percentuali di atomi non facenti parte del semiconduttore stesso allo scopo di modificare le proprietà elettriche del materiale. Infatti, un substrato di silicio fortemente drogato coinvolge più portatori di carica nel meccanismo di trasferimento di carica rispetto a uno leggermente drogato, quindi più veloce. Le principali difficoltà, associate a questa tecnica, sono la realizzazione di finestre d'attacco con elevata precisione utilizzando, come materiali di *maschera*, materiali attaccabili dalle sostanze utilizzate nel processo e, in secondo luogo, la forte dipendenza del processo di incisione dalla temperatura e dall'agitazione dei reagenti che rende difficile il controllo sulle geometrie laterale e verticali dell'incisione.

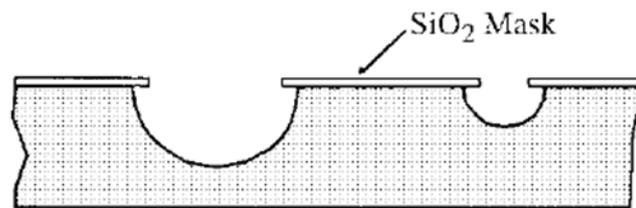


Figura 1.2 Attacco isotropico in presenza di agitazione dei reagenti

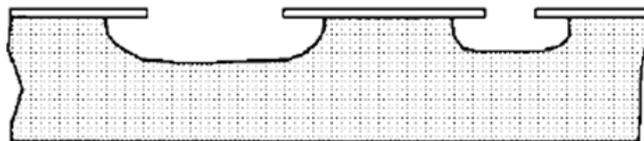


Figura 1.3 Attacco isotropico in assenza di agitazione dei reagenti

1.2.Wet anisotropic etching

L'attacco di tipo anisotropico si basa sulla possibilità di incidere il materiale con velocità diverse a seconda dell'orientamento dei piani cristallografici esposti all'attacco, grazie all'utilizzo di sostanze alcaline³, che reagiscono in maniera diversa a seconda della direzionalità di incisione. Con i giusti accorgimenti si può ottenere un controllo maggiore sulle

³ Una sostanza alcalina è una sostanza, che disciolta in acqua H_2O , producono ioni OH^- .

dimensioni laterali dell'incisione e, quindi, varie forme geometriche e contorni perfettamente definiti dai piani cristallografici. Il principale svantaggio di tale processo rispetto all'attacco isotropico è la più lenta velocità di incisione, di qualche micrometro al minuto ($\mu\text{m}/\text{min}$), a fronte di decine di micrometri nel caso isotropico.

La tecnica *wet anisotropic etching* dipende fortemente dalla temperatura, tanto che al suo aumentare diminuiscono le irregolarità superficiali dell'incisione, quindi il processo si affronta a temperature elevate ($80 - 85^\circ\text{C}$), ma tali comunque da non far evaporare le sostanze attaccanti. Una caratteristica fondamentale dell'attacco anisotropico è la sostanza impiegata. La sua scelta dipende da vari fattori, come la facilità di manipolazione, la tossicità, la velocità d'attacco, la compatibilità con i processi di fabbricazione dei circuiti integrati, la tecnica di arresto dell'attacco, la selettività di incisione sui materiali, e dai materiali utilizzati per realizzare le maschere d'attacco. I reagenti più usati sono le soluzioni acquose di *KOH* (idrossido di potassio) con aggiunta di alcool isopropilico oppure etilendiammina con aggiunta di pirocatecolo (acronimo *EDP*), soluzione difficilmente manipolabile, a causa della sua tossicità e della degradazione delle sue proprietà in seguito a reazioni con l'ossigeno, ma con il vantaggio di essere più veloci e con una maggiore selettività *Si/SiO₂* rispetto a *KOH*.

Una caratteristica comune a tutte le soluzioni anisotropiche è la drastica diminuzione della velocità di attacco al silicio, se questo contiene una concentrazione di atomi droganti di boro superiore a $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, oppure di altri droganti come fosforo (*P*) e germanio (*Ge*), ma in concentrazioni maggiori. Questi strati di silicio ad alto drogaggio, ottenute per impiantazione ionica⁴, oppure deposizione e diffusione, vengono sfruttati per arrestare il processo di incisione, in modo tale da ottenere la geometria strutturale desiderata.

| Attaccante/Diluente/Additivo/Temperatura | Etch-Stop |
|---|---|
| <i>KOH/ H₂O/ alcool/ isopropile/ 85° C</i> | $B > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ |
| <i>EDP/ H₂O/ pirazina/ 115° C</i> | $B > 5 * 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ |
| <i>TMAH/ H₂O/ 90° C</i> | $B > 4 * 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ |
| <i>N₂H₄ (idrazina)/ H₂O/ alcool isopropile/ 115° C</i> | $B > 1.5 * 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ praticamente arresta l'incisione |

Tabella 1.1 Drogaggio di quattro principali sostanze attaccanti anisotropiche per fermare l'incisione

⁴ Impiantazione ionica: processo in cui degli ioni vengono impiantati in un solido cambiandone le proprietà fisiche.

1.3. Plasma isotropic etching

Le tecniche più comuni di *dry etching*, ovvero la tecnica d'incisione del substrato di silicio tramite plasma, sono *plasma etching* e RIE (*reactive ion etching*).

Il principio di funzionamento si basa sull'utilizzo di un campo elettrico ad alta frequenza per generare delle specie chimicamente reattive, come possono essere gli ioni e i radicali, a partire da un gas o miscela relativamente inerte.

Questa tecnica sfrutta l'energia esterna immessa sotto forma di potenza RF (*radio-frequency*), per pilotare reazioni chimiche in camere di reazione a bassa pressione. Gli ioni forniscono l'energia necessaria affinché le reazioni possano avvenire a temperature relativamente basse (centinaia di gradi celsius).

La potenza RF applicata ai capi di due elettrodi accelera gli elettroni liberi, aumentando la loro energia cinetica a un livello tale da poter rompere i legami chimici nei gas reagenti tramite urti, formando ioni ed elettroni aggiuntivi. Con l'alimentazione ininterrotta della camera con energia RF, genera collisioni continue tra molecole producendo ioni ed elettroni, mentre le superfici esposte, all'interno della camera, assorbono o neutralizzano queste specie. Dopo un adeguato numero di cicli RF, una scarica in regime stazionario è raggiunta. I processi di generazione e neutralizzazione sono bilanciati e, quindi, si può far reagire il gas inerte. La scelta del gas è fatta in modo tale che le specie prodotte reagiscano chimicamente con il materiale da rimuovere formando dei prodotti volatili estraibili dalla camera di reazione tramite un opportuno sistema di pompaggio. I gas più frequentemente usati sono i clorofluorocarburi, i composti bromici e l'ossigeno. Principalmente nell'attacco al silicio si usano gas contenenti fluoro, come a esempio CF_4 , tetrafluorometano. Con questo tipo di gas le principali specie di attacco sono gli atomi di fluoro e il prodotto volatile della reazione, è il tetrafluoruro di silicio (SiF_4).

L'attacco al plasma è prevalentemente un attacco di tipo isotropico. E' possibile, tuttavia, ottenerne uno di tipo anisotropico intensificando la reazione chimica di attacco in una direzione preferenziale. Questo risultato è ottenuto mediante bombardamento della superficie del *wafer* con ioni ad alto contenuto energetico sotto l'influenza di un campo elettromagnetico a radio frequenza (RF). Questo impedisce che specie inibitrici coprano la superficie stessa rafforzando l'attacco nella direzione desiderata.

1.3.1. *Reactive Ion Etching (RIE)*

In questo processo il *wafer* di silicio, all'interno della camera di reazione, è montato direttamente sull'elettrodo alimentato da un campo elettrico ad alta frequenza, che funge da catodo. Gli ioni, carichi positivamente, vengono attratti dalla superficie del *wafer* esposta all'attacco e accelerati verso questa da una tensione di polarizzazione, che viene a crearsi

tra la superficie e il plasma, determinando così il bombardamento ionico voluto.

Una variante della RIE, che permette incisioni con pareti quasi verticali con profondità di qualche centinaio di micrometri è la DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*).

1.4. Etch-stop techniques

Per poter realizzare delle strutture di geometria ben precisa, con opportune profondità e spessore, è necessario poter fermare il processo di incisione al silicio, in modo tale da ottenere la struttura desiderata. Essendo i processi di attacco chimico sostanzialmente dei fenomeni di trasferimento di carica, la velocità d'attacco è funzione del tipo di droganti, concentrazione e della polarizzazione del *wafer*.

Tra le tecniche di etch-stop si ricordano:

- *Doping Selective Etching (DSE)*
- *Bias Dependent Etching (BSE)*

1.4.1. Doping Selective Etching (DSE)

Nella DSE, sfruttiamo la capacità, delle soluzioni di attacco anisotropiche, di ridurre in modo drastico la propria velocità d'attacco al silicio, all'aumentare della concentrazione di droganti (atomi di Boro), fino a pervenire a una condizione tale da ritenere arrestato il processo di incisione. La tecnica di arresto consiste nel definire la regione di silicio, dove il processo deve arrestarsi, e drogarla opportunamente con atomi di boro mediante tecniche di diffusione, impiantazione ionica oppure mediante crescita epitassiale di uno strato di silicio più drogato sopra uno meno drogato. Questa tecnica ci permette di realizzare delle strutture sospese con geometrie laterali arbitrarie, come i *cantilever*, tipo di struttura sporgente a mensola.

I principali svantaggi di questo processo sono l'elevato drogaggio, che introduce un elevato stress meccanico nella struttura con possibile deformazione e rottura della stessa oltre all'incompatibilità con i processi CMOS.

Per attenuare lo stress meccanico sono state introdotte diverse specie di atomi droganti in alternativa al Boro, come il Fosforo e il Germanio. Per quanto riguarda l'incompatibilità con i processi di produzione CMOS, si sfrutta la crescita epitassiale di uno strato meno drogato su cui sarà integrata l'elettronica prevista che va a seppellire così la regione di *etch-stop*.

1.4.2. Bias Dependent Etching (BSE)

Nel caso della BSE, nota anche con il nome di *electrochemical etch-stop*, siamo di fronte a un diverso comportamento tenuto dal silicio al variare del tipo di drogante, di tipo *p* o *n*, quando viene inciso con attacco elettrochimico. In questo processo il *wafer* di silicio è immerso in una soluzione attaccante isotropica (acida) o anisotropica (alcalina). Creando

una differenza di potenziale, tra un contatto ohmico realizzato sul wafer, che costituirà l'anodo della cella elettrochimica, e un elettrodo metallico (catodo), si ottiene la polarizzazione del silicio.

Se la velocità di ossidazione del silicio è inferiore alla massima velocità di dissoluzione ottenibile, allora si ha l'erosione e quindi l'incisione, altrimenti si ha la completa passivazione dalla superficie del silicio con annesso arresto del processo chimico. La tecnica di arresto *electrochemical etch-stop* sfrutta la caratteristica tensione-corrente ($I - V$) del sistema elettrochimico. Esso dipende dal tipo di drogante e dalla concentrazione.

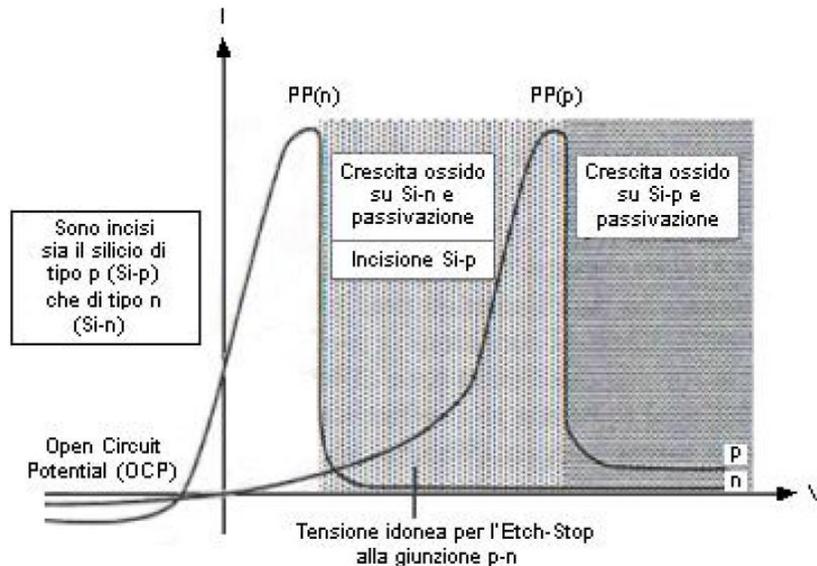


Fig 1.3 Caratteristica tensione-corrente per Si di tipo n e di tipo p in soluzione di KOH

Osservando la caratteristica $I - V$ si può individuare un valore di tensione definito potenziale di passivazione (PP), che delimita il passaggio tra due diversi modi di funzionamento del processo elettrochimico. Per tensioni di polarizzazione inferiori a PP , la velocità di massima dissoluzione è maggiore della velocità di formazione e, quindi, si ha la rimozione del silicio dalla superficie esposta all'attacco. Invece, per tensioni superiori alla PP , la velocità di formazione dell'ossido è superiore alla velocità con cui viene disciolto dall'acido, pertanto siamo di fronte a una crescita dello strato di SiO_2 , che induce una passivazione della superficie di silicio oggetto dell'attacco. Si può notare dalla caratteristica $I - V$ che esiste una sostanziale differenza di PP tra il *wafer* di silicio di tipo p e n . Tale differenza è sfruttata nella tecnica di arresto in cui una giunzione $p-n$, leggermente drogata, viene usata come regione di arresto.

Se entrambe le regioni del *wafer*, sia di tipo p sia n , sono esposte alla soluzione attaccante e sono mantenute a un potenziale appartenente al range di passivazione per il silicio di tipo n e di rimozione per quello di tipo p , allora quest'ultimo viene intaccato dalla soluzione, mentre la regione di tipo n non ne viene intaccata. Nonostante questa tecnica porti alla realizzazione

di microstrutture di silicio di tipo n con bassi livelli di drogaggio, quindi con stress meccanico minore, presenta comunque due principali limitazioni:

- la presenza di una corrente di fuga può compromettere l'intero processo *etch-stop*;
- la difficoltà di realizzare adeguati sistemi di ancoraggio per il *wafer (holder)*.

1.4.2.1. Corrente di fuga

La presenza di una corrente di fuga elevata porta alla passivazione della regione di tipo p esposta all'attacco prima che questo abbia raggiunto la giunzione p - n , con conseguente arresto prematuro del processo.

1.4.2.2. Sistemi di ancoraggio

Per quanto riguarda l'*holder*, esso deve garantire, un contatto ohmico a bassa impedenza con lo strato epitassiale del *wafer*, essere inerte alle soluzioni attaccanti, e non deve introdurre tensioni meccaniche, che potrebbero portare alla frattura della struttura.

Per ovviare alle problematiche dovute alla realizzazione del *holder* è stata sviluppata la tecnica *Photo Induced Preferential Anodisation (PIPA)*, che non necessita di elettrodi metallici e quindi contatti ohmici. In questo processo, a due elettrodi, la tensione di polarizzazione della giunzione p - n è generata internamente al silicio mediante l'illuminazione della giunzione p - n . Lo svantaggio principale è il non poter monitorare le varie fasi dell'attacco.

2.SURFACE MICROMACHINING

La tecnologia di microfabbricazione, *surface micromachining*, consiste nell'ottenere una struttura meccanica mobile partendo da uno strato di materiale adeguatamente scelto (strato strutturale), depositato al di sopra di uno strato spaziatore, che verrà rimosso per rendere la struttura libera di muoversi al di sopra della superficie del substrato. [3][4]

La geometria della microstruttura è ottenuta tramite tecniche planari di fotolitografia⁵ e rimozione dei materiali, nonché tramite tecniche di deposizione, principale causa di limitazione delle dimensioni della struttura. La *surface micromachining* richiede l'utilizzo di materiali strutturali, sacrificali e sostanze attaccanti compatibili tra di loro. I materiali strutturali devono avere una tensione di snervamento e rottura elevata, una buona resistenza all'usura e un basso livello di affaticamento. I materiali sacrificali devono garantire una buona adesione alle superfici circostanti e devono presentare un basso stress residuo per impedire

⁵ Fotolitografia: processo tecnologico usato per riprodurre su substrati le geometrie rappresentate su maschere. Tale riproduzione è effettuata sovrapponendo una sottile lamina di gelatina fotosensibile (photoresist) al substrato stesso e procedendo all'illuminazione. [c]

la rottura o l'incrinco dello strato strutturale. Invece, gli agenti attaccanti devono avere un buon grado di selettività, in modo tale da rimuovere lo strato sacrificale senza attaccare quello strutturale e neanche il materiale di cui è fatta la superficie di riferimento sopra la quale è costruita la struttura. Nella maggior parte delle applicazioni viene impiegato come strato strutturale il silicio policristallino, con strato sacrificale l'ossido di silicio e, infine, come sostanza attaccante una soluzione acquosa di acido fluoridrico.

Il processo di *surface micromachining* può essere suddiviso in alcune fasi ben precise:

1. Diffusione di droganti donatori nel substrato di silicio monocristallino iniziando dalla parte superiore del *wafer* in modo tale da formare un sottile strato drogato di tipo n^+ , che costituirà il *piano di lavoro*. La diffusione di solito è seguita da una passivazione del substrato mediante deposizione di nitrato di silicio (Si_3N_4), che creerà uno strato cuscinetto (isolante).
2. Deposizione del materiale sacrificale, ovvero dell'ossido di silicio oppure di vetro fosfosilicato, che permette di aumentare la velocità d'attacco della soluzione di acido fluoridrico, e costituisce per lo strato di silicio policristallino una sorgente di impurità droganti, determinando una buona conduttività elettrica. Dopo la deposizione si attua un trattamento termico a elevate temperature ($950^\circ C$) per addensare il fosfosilicato e uniformare la velocità d'incisione su tutto lo strato.
3. Deposizione del materiale strutturale, ossia del silicio policristallino, anch'esso seguito da un trattamento termico a elevate temperature ($1050^\circ C$) in ambiente di azoto (N_2) per ottenere una struttura granulare, il più possibile uniforme, e per ridurre lo stress meccanico residuo, che può portare a deformazioni della struttura. La struttura in silicio policristallino può essere resa conduttiva mediante drogaggio ottenuto attraverso, processo di diffusione a partire dallo strato di vetro fosfosilicato sottostante il silicio policristallino, impiantazione ionica seguita da un trattamento termico per la diffusione dei droganti, oppure reazione chimica del flusso gassoso di silano puro (SiH_4), da cui si ottiene per decomposizione termica il silicio policristallino, con gas dopanti (fosfina, arsina, boro).
4. Rimozione, delle parti in eccesso di polisilicio mediante attacco al plasma, dello strato sacrificale mediante immersione del *wafer* in soluzione tampone di HF e per quello compreso tra substrato di silicio e strato strutturale tramite *wet etching*, e infine definizione della geometria mediante processo di fotolitografia.
5. Risciacquo del *wafer* in acqua deionizzata e asciugatura sotto una lampada a infrarossi per ridurre il fenomeno dello *stiction*.

2.1. Stiction

Il fenomeno dello *stiction* si presenta in fase di asciugatura. E' dovuto alla tensione superficiale del liquido di risciacquo intrappolato nelle cavità presenti nella struttura. La tensione superficiale del liquido attira la struttura verso il substrato facendola collassare su di questo. Una volta incollata la struttura, la forza necessaria per liberarla è tale da poter danneggiare la struttura stessa.

Tale fenomeno può essere ridotto prevedendo:

- delle protuberanze sulla superficie inferiore della struttura, dette *stand-off bumps*, che hanno lo scopo di conferire alla struttura una capacità di richiamo verso l'alto;
- la sostituzione di porzioni di materiale sacrificale con materiale polimerico, inattaccabile dalle sostanze attaccanti, che fungerà da *colonna* spaziatrice durante la fase di asciugatura e che, di seguito, viene rimossa tramite attacco isotropico con plasma per liberare la struttura;
- una asciugatura per sublimazione (a freddo) usando alcool t-butil oppure una miscela di acqua e metanolo;
- la copertura delle strutture mobili con una pellicola di polimero auto-aggregante idrorepellente, che viene eseguita mentre la struttura si trova ancora nella fase di risciacquo.

2.2. Tecnologie di microfabbricazione a supporto della surface micromachining

Le dimensioni delle microstrutture ricavate tramite surface micromachining sono limitate rispetto alla bulk micromachining, per questo sono state sviluppate diverse tecnologie di microfabbricazione, che hanno ampliato le possibilità costruttive della surface micromachining. Tra di queste annoveriamo la SOI surface micromachining, la HEXSIL e la LIGA.

2.2.1. Silicon On Insulator (SOI) surface micromachining

La tecnica SOI prevede l'utilizzo di *wafer* caratterizzati da uno strato di silicio monocristallino collocato al di sopra di uno strato isolante.

Le principali tecniche di realizzazione dei *wafer* SOI sono:

- *SIMOX (Separated by Implanted Oxygen)*, consiste nel generare lo strato isolante internamente a un substrato di silicio monocristallino mediante impiantazione ionica di atomi di O_2 a partire dalla superficie superiore del wafer, e seguita da un trattamento termico a temperature elevate ($1300^\circ C$). Dosando opportunamente le specie impiantate, la loro energia e la temperatura del trattamento termico, determiniamo la profondità e lo spessore dello strato sepolto.

- *Silicon fusion bonded* consiste nell'ottenere il *wafer* SOI a partire dall'unione di due wafer di silicio monocristallino su uno dei quali è stato fatto crescere uno strato di ossido di silicio di spessore desiderato.
- *Zone melt recrystallized (ZMR)* consiste nel far ricristallizzare uno strato di silicio policristallino depositato al di sopra di un wafer di silicio monocristallino sulla cui superficie è stato fatto crescere precedentemente uno strato di SiO_2 .

I *wafer* così prodotti consistono in un substrato di silicio monocristallino e da un sottile strato dello stesso materiale (strato strutturale) separati tra di loro da uno strato isolante di ossido di silicio, SiO_2 , o nitrato di silicio, Si_3N_4 (strato sacrificale).

2.2.2. HEXSIL

Nella HEXSIL, per prima cosa vengono realizzate delle incisioni profonde su un substrato di silicio monocristallino tramite attacco al plasma. Praticate le incisioni viene depositato un sottile strato di vetro fosfosilicato o ossido di silicio, in modo tale che il materiale si distribuisca uniformemente su tutta la superficie del wafer esposta al processo. Esso rappresenterà lo strato sacrificale. Infine il rimanente volume delle incisioni viene riempito con materiale strutturale.

Con il processo di levigatura e di pulitura viene resa planare la superficie superiore del wafer rimuovendo le parti in eccesso di materiale strutturale al di sopra di quello sacrificale. Di seguito avviene la deposizione di un altro strato di materiale strutturale sagomato, mediante fotolitografia o attacco al plasma, in modo tale da realizzare delle interconnessioni di silicio policristallino tra le varie strutture formate nelle incisioni. Alla fine viene rimosso lo strato sacrificale mediante attacco chimico in soluzione di acido fluoridrico.

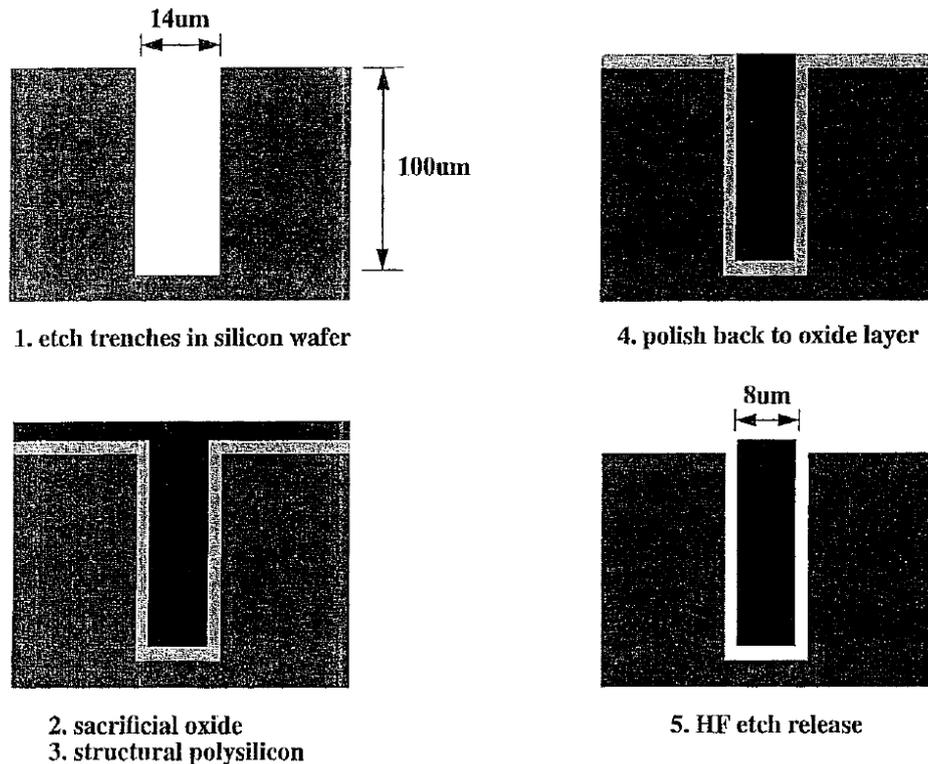


Figura 1.4 Linea guida del processo HEXSIL

2.2.3.LIGA

L'abbreviazione sta per litografia, galvanometria e modellatura (dal tedesco *Lithographie Galvanoformung Abformung*), che sono i passaggi fondamentali di questo processo. Per il processo litografico viene utilizzata la litografia a raggi X. Le strutture plastiche vengono depositate su uno strato base metallico. Successivamente al processo di sviluppo le diverse zone strutturali possono essere colmate con metalli (nichel, oro, rame, leghe). Dopo l'aumento del metallo la plastica rimanente viene rimossa e rimangono microstrutture metalliche. Con il processo LIGA è possibile produrre strutture molto numerose fino al millimetro con parti laterali quasi verticali e molto lisce. [a]

3.BONDING TECHNIQUES

La realizzazione di un dispositivo meccanico complesso richiede, oltre alla realizzazione delle singole parti, anche il loro assemblaggio.

Tra le tecniche di assemblaggio quelle più usate sono le *wafer bonding* che si suddividono in:

- *Fusion bonding*, consiste nell'unire due wafer facendole aderire tra di loro mediante legami ponte idrogeno presenti nelle molecole di acqua chemisorbite⁶ e poi sottoponendoli a un trattamento termico di ricottura (700° – 1100° C) per far reagire i

⁶ Chemisorbimento: fenomeno fisico-chimico, che consiste nell'accumulo di una o più sostanze fluide sulla superficie di un condensato. [c]

legami ponte idrogeno, in modo tale da formare legami più forti $Si - O - Si$. L'elevata temperatura oltre ai suoi benefici introduce anche problemi come lo stress termico, allargamento del profilo di drogaggio, contaminazioni e generazione di difetti. (Figura 1.5)

- *Anodic bonding*, consiste nell'unione dei wafer di silicio mediante sigillatura con deposizione di un sottile strato di vetro.

Solitamente entrambi i processi prevedono una fase di pre-trattamento superficiale (pulitura chimica e idrofilizzazione) dei *wafer*, necessaria per eliminare eventuali impurità o difetti, che durante il processo potrebbero portare alla creazione di vuoti interstiziali tra i *wafer* e, quindi, compromettere la loro integrità.

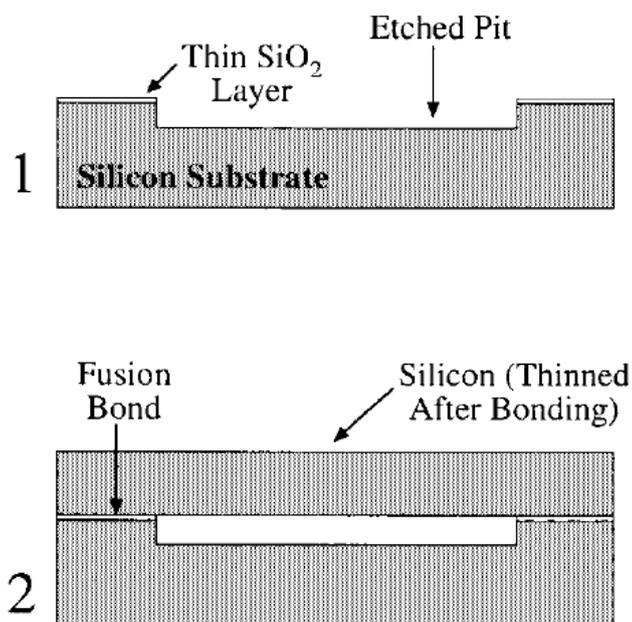


Figura 1.5 Esempio di fusion bonding

CAPITOLO 2

Sensori Inerziali

1.Importanza dei sensori inerziali MEMS

I sensori inerziali basati sulla tecnologia MEMS, oggi giorno, sono impiegati in diversi dispositivi elettronici di consumo come smartphones, tablet, TV ecc. Il loro utilizzo è stato favorito, innanzitutto, dalla possibilità di integrare la tecnologia MEMS con la tecnologia CMOS determinando una riduzione notevole delle dimensioni dei chip e un abbassamento dei prezzi di produzione. Ai vantaggi dimensionali ed economici si aggiunge la consapevolezza dei benefici ottenibili dall'utilizzo della capacità di tracciamento del movimento (*motion detection*) per implementare l'esperienza interattiva dei consumatori con i vari dispositivi elettronici presenti sul mercato.

Infatti il sistema di *motion detection*, fondato sulla tecnologia MEMS, sta alla base del *touchscreen* e del riconoscimento vocale, grazie ai sensori multiassiali, come gli accelerometri e i giroscopi. Le applicazioni, che hanno favorito l'affermarsi della tecnologia di rilevazione del movimento, e quindi dei sensori inerziali MEMS, sono la *OIS (optical image stabilization)* e il *LBS (location-based service)*. [5]

1.1.Optical image stabilization(OIS)

Lo stabilizzatore d'immagine è un sistema, che permette l'acquisizione di immagini e video senza il tremolio involontario generato dalla mano (*hand jitter*) o dalla nostra respirazione, soprattutto quando si utilizzano degli zoom potenti e dei tempi di apertura dell'otturatore abbastanza lunghi, donando alle immagini una nitidezza maggiore rispetto a una foto o ripresa effettuata senza questo sistema. Lo stabilizzatore ottico funziona tramite un sistema meccanico integrante un giroscopio, che muovendo delle lenti asseconda i movimenti involontari della mano in modo da controbilanciare lo spostamento. Questo sistema può essere costituito anche da una sola lente, che spostandosi corregge l'asse ottico dell'immagine, riducendo la sfocatura o il tremolio.

1.2.Location Based Services (LSB)

La possibilità di identificare, automaticamente, la posizione (geolocalizzazione) ha aperto la strada allo sviluppo di diversi servizi di grande interesse, *chiamati Location Based Services*

(LBS). Gli LBS sono usati principalmente per poter inviare all'utente informazioni affidabili su una determinata area geografica (per lo più prossima alla sua posizione): mappe, informazioni meteo, ma anche notizie su luoghi d'interesse, servizi ed esercizi commerciali. Alcuni social network integrano gli LBS nella loro piattaforma, generando dei post geolocalizzati rappresentanti una forma, notevolmente arricchita, di oggetto comunicativo e rendono l'esperienza da condividere sempre più densa. L'interesse in chiave economica nei confronti di queste tecnologie è di primaria importanza perché consente di creare offerte personalizzate per i potenziali acquirenti in base alla loro posizione e di avere un maggior numero di dati sulle abitudini di consumo della propria clientela.

In questo capitolo si analizzano principalmente due applicazioni molto presenti nell'elettronica di consumo come lo sono gli accelerometri e i giroscopi, introducendo però prima il sistema meccanico sottostante i sensori inerziali, ovvero il sistema massa-molla-smorzatore.

2.Sistema elettromeccanico massa-molla-smorzatore

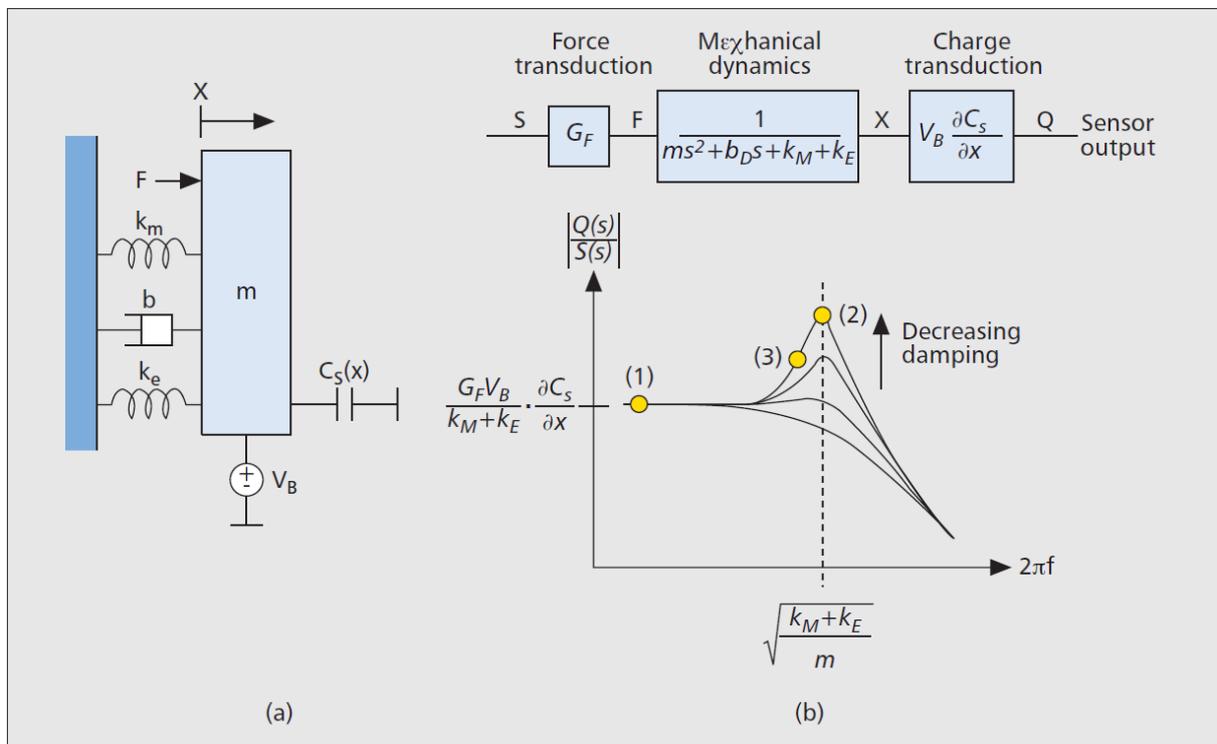


Fig. 2.1 a) Sistema elettromeccanico massa-molla-smorzatore b) Modello equivalente di sistema dinamico di secondo ordine, con le relative simulazioni a (1) DC (2) risonanza (3) fuori dalla risonanza

Il principio base di funzionamento di un sensore inerziale può essere compreso facendo riferimento al sistema canonico rappresentato in figura 2.1 a). In questo sistema una massa di prova è appesa a un telaio meccanico tramite una molla, k_m , e risponde allo stimolo di una forza F in ingresso, rappresentate la grandezza fisica, che intendiamo misurare. La forza in ingresso determina uno spostamento, x , della massa, e tale spostamento è misurato per definire il misurando, ovvero la forza applicata sulla massa. Per esempio la forza può essere determinata attraverso l'accelerazione della massa, come nel caso dell'accelerometro, oppure attraverso l'accelerazione di Coriolis, causata dalla rotazione angolare della massa, come nel caso dei giroscopi. Esistono sensori, che impiegano diversi metodi di trasduzione, per trasformare la grandezza d'interesse in una forza agente sulla massa di prova.

Un sensore di qualità, solitamente, possiede un elevato guadagno di trasduzione ed elimina gli effetti parassiti agenti sulla massa, che possono degradare l'accuratezza del sensore. Tra le forze parassite si annoverano le tensioni dovute al *packing*, all'espansione termica, oppure forze agenti sulla massa di prova determinate da movimenti di tipo diverso rispetto a quelli che vogliamo misurare. La massa di prova è, inoltre, soggetta a forze smorzanti proporzionali alla loro velocità, rappresentate in figura 2.1 a) da un coefficiente di smorzamento b . Lo smorzamento può essere causato da diversi fattori, tuttavia quello dominante è rappresentato dall'aria. Quindi, se si necessita un sensore inerziale di alta qualità, è importante sigillare ermeticamente i componenti meccanici in modo da operare a basse pressioni. La chiusura ermetica protegge anche da eventuale sostanze contaminanti di interferire con le funzionalità del sensore.

In questo elaborato si è concentrati sulla trasduzione elettrostatica, tuttavia esistono anche altri metodi possibili come la trasduzione piezoelettrica, meccanica, elettronica, ottica ecc. Misurare lo spostamento della massa attraverso la trasduzione elettrostatica significa montare un condensatore, $C_s(x)$, con un'estremità appoggiata sulla massa e l'altra fissa al telaio. Applicando un'opportuna tensione di polarizzazione, V_b , una variazione della carica, ΔQ , è indotta sulla capacità da uno spostamento della massa, Δx , in accordo con la formula :

$$\Delta Q(\Delta x) = \frac{\partial C_s(x)}{\partial x} \cdot V_b \cdot \Delta x \quad (1)$$

Si nota che la derivata prima rispetto alla posizione di $C_s(x)$ insieme alla tensione di polarizzazione determinano la sensibilità della carica. La sensibilità della carica può essere espressa anche in funzione dei parametri geometrici della capacità e della permittività dell'aria, ϵ_0 .

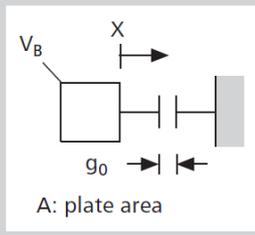
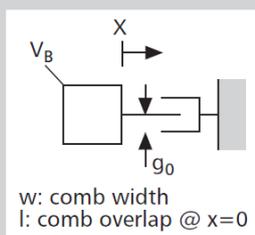
| | Capacitance | Charge transduction | Force transduction | Spring constant |
|--|---------------------------------|---|---|-------------------------------------|
| | $C(x)$ | $\Delta Q(\Delta x)$ | $\Delta F(\Delta v)$ | k_E |
| Parallel-plate capacitor  A: plate area | $\frac{\epsilon_0 A}{g_0 - x}$ | $\frac{\epsilon_0 A}{g_0^2} V_B \Delta x$ | $\frac{\epsilon_0 A}{g_0^2} V_B \Delta v$ | $-\frac{\epsilon_0 A}{g_0^3} V_B^2$ |
| Comb-finger capacitor  w: comb width l: comb overlap @ x=0 | $\frac{\epsilon_0 w(l+x)}{g_0}$ | $\frac{\epsilon_0 w}{g_0} V_B \Delta x$ | $\frac{\epsilon_0 w}{g_0} V_B \Delta v$ | 0 |

Figura 2.2 Trasduzione di carica, trasduzione di forza e costante elastica elettrostatica per due configurazioni note dei condensatori.

Oltre alla loro funzione di trasduzione della carica, i condensatori possono essere usati per indurre una forza elettrostatica sulla massa di prova. La forza elettrostatica è legata al gradiente potenziale di energia della carica immagazzinata all'interno dei condensatori. Con una tensione di polarizzazione fissa, V_b , e assumendo condizioni di funzionamento ai piccoli segnali, la variazione della forza, ΔF , è funzione del cambiamento della tensione ai terminali della capacità, Δv , come segue :

$$\Delta F(\Delta v) = \frac{\partial C_s(x)}{\partial x} \cdot V_b \cdot \Delta v \quad (2)$$

Come nel caso della trasduzione di carica, anche in questo caso si osserva che la derivata prima rispetto alla posizione di $C_s(x)$ insieme alla tensione di polarizzazione determinano la forza. Anche se non esplicitamente usato per la trasduzione della forza, la capacità, $C_s(x)$, ha associata, intrinsecamente, una forza variabile con la posizione della massa di prova. Per piccoli spostamenti, l'effetto di questa forza elettrostatica sul sistema dinamico può essere rappresentata da una costante elastica equivalente, chiamata k_E . Tuttavia, poiché le forze elettrostatiche sono attrattive in natura, la costante elastica elettrostatica è negativa, favorendo il fenomeno noto come *electrostatic spring softening*, dove la forza elettrostatica riduce l'effettiva costante elastica del sistema.

Questa riduzione della costante elastica del sistema può portare a completa instabilità meccanica, nota come *pull-in*, se l'ampiezza della costante elastica elettrostatica, k_E , supera

la costante elastica meccanica, k_M . Il sistema elettromeccanico in figura 2.1. b) è un sistema dinamico del secondo ordine. Il dominio delle frequenze, della carica in uscita, dipende dal segnale in ingresso al sensore, dove G_F rappresenta la trasduzione del segnale entrante in una forza agente sulla massa di prova; la dinamica meccanica correla la variazione della posizione alla forza applicata, basandosi su entrambe le costanti elastiche sia meccanica sia elettrostatica, e la trasduzione della carica determina la conversione dalla posizione alla carica in uscita.

Come illustrato nella figura 2.1 b) esistono diverse funzioni di trasferimento del sensore in funzione della scelta della massa di prova, costanti elastiche, coefficiente di smorzamento, tensione di polarizzazione, e sensibilità capacitiva. Si possono individuare tre possibili condizioni di lavoro di interesse:

- Lavorare a o vicino a D.C.
- Lavorare a frequenza di risonanza
- Lavorare a frequenza fuori risonanza

3. Interfaccia sensore e misure di energia

Tutti i sensori MEMS chiedono connessioni, tra i segnali analogici e quelli misti, dedicate per elaborare e digitalizzare il segnale in uscita dal sensore. Le diverse funzioni, previste dall'interfaccia del sensore, forniscono una tensione costante di polarizzazione (bias) al dispositivo MEMS, che amplifica il flusso di carica del segnale a livelli misurabili, e massimizza il *signal-to-noise ratio*¹ (SNR), in modo tale da fornire al filtro il segnale necessario da processare per estrarre quello desiderato, stabilizzando le prestazioni del sensore.

3.1. Figura di merito

Una figura di merito (FOM) utile, basata sull'energia, viene ricavata prendendo il rapporto tra il picco SNR (espresso come un rapporto di potenza) e l'energia necessaria alla conversione. Un'elevata FOM indica un'ottima prestazione del sensore per un dato rumore operante a basso consumo energetico.

¹ Signal to noise ratio è una grandezza numerica, che mette in relazione la potenza del segnale utile rispetto a quella del rumore in un qualsiasi sistema di acquisizione, elaborazione o trasmissione dei dati.

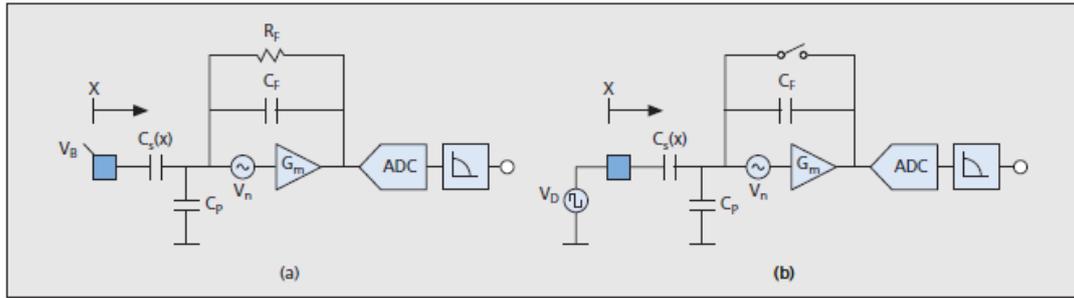


Figura 2.3 Schemi del sensore : a) tempo continuo b) tempo discreto.

La prima configurazione esposta in figura 2.3 usa la misura a tempo continuo. Una tensione fissa di polarizzazione, V_b , è applicata alla massa di prova del dispositivo MEMS, inducendo un movimento della massa che determina una variazione del flusso di carica, di seguito amplificato prima della conversione analogico-digitale. La larghezza di banda di questo sistema è limitata da un filtro, che fornisce così l'uscita desiderata. Nella seconda configurazione, a tempo discreto, la massa è comandata da una tensione di pilotaggio, V_D , dopo che l'amplificatore è stato resettato. La tensione risultante è poi digitalizzata e filtrata per ottenere il segnale voluto. In entrambe le configurazioni, il rumore termico è introdotto dall'amplificatore in relazione alla sua transconduttanza, G_m . Un'elevata transconduttanza comporta un tensione equivalente ridotta, v_n , dovuta al rumore in ingresso.

E' stato dimostrato che per tali configurazioni, nel caso di condensatore a piani piatti paralleli, la FOM presenta la seguente forma:

$$\frac{SNR}{E_c} \propto \frac{1}{4kT} \cdot \frac{\Delta x^2}{g_0^2} \cdot \frac{V_{B(D)}^2}{V_{DD}^2} \cdot \left(\frac{C_s}{C_s + C_p} \right) \quad (3)$$

Procedendo un termine alla volta si possono identificare alcuni parametri fondamentali per ottimizzare il dispositivo:

- Massimizzare l'oscillazione meccanica su tutta la scala ($\Delta x/g_0$):

Il dispositivo MEMS operante alla sua oscillazione massima dovrebbe fornire massimo spostamento meccanico come una frazione del gap, g_0 . Lo spostamento funzionale è limitato dalla non-linearità dovuta alla dipendenza del gap dalla capacità.

- Massimizzare la tensione di polarizzazione o di pilotaggio ($V_{B(D)}/V_{DD}$):

Una tensione di polarizzazione (caso sistema a tempo continuo) o di pilotaggio (caso tempo discreto) più grande, come una percentuale della tensione di alimentazione, può determinare un segnale in uscita ottimizzato nonché un miglioramento del SNR.

- Minimizzare le capacità parassite ($C_s/C_s + C_p$):

La presenza della capacità parassita aggiuntiva, C_p , produce rumore addizionale, che degradano il SNR. La figura di merito basata sull'energia può essere usata per decidere i

giusti compromessi nella scelta dell'architettura dell'interfaccia del sensore. Può essere anche usata per confrontare in diversi tipi di sensore e scegliere quello adatto alla nostra applicazione.

4. Accelerometro

Un accelerometro è un dispositivo elettromeccanico, che misura forze di accelerazione. Queste forze possono essere statiche, come lo è la forza di gravità, oppure dinamiche, causate da urti oppure da vibrazioni dell'accelerometro. [6]

4.1. Configurazione massa-molla-smorzatore

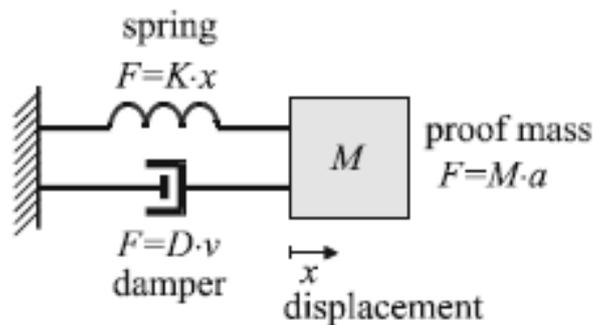


Figura 2.4 Rappresentazione semplificata di un accelerometro

Il sistema più semplice per schematizzare un accelerometro è la configurazione massa-molla-smorzatore.

Esso è costituito da una massa M , una molla elastica di costante elastica K , che costituisce l'elemento elastico a cui è applicata la massa, e uno smorzatore con costante di attrito viscoso D , dovuto all'aria o altro fluido. Alla massa viene applicata una forza $F = m \cdot a$, dove a rappresenta l'accelerazione subita dalla massa. Il principio di funzionamento prevede che accelerando il sistema, la massa esercita una forza inerziale sulla molla determinando a una deformazione della molla stessa e, quindi, uno spostamento della massa di prova che può essere usato per ottenere un segnale da misurare. Il comportamento del sistema risulta essere del secondo ordine. L'equazione, che mette in relazione la forza F , e quindi l'accelerazione a applicata alla massa M , con lo scostamento x dalla posizione di equilibrio della stessa è la seguente:

$$M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + D \frac{\partial x}{\partial t} + Kx = F = Ma \quad (4)$$

dividendo tutto per M otteniamo la seguente espressione:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{\omega_n}{Q} \frac{\partial x}{\partial t} + \omega_n^2 = a \quad (5)$$

Dove sono stati definiti i parametri:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \text{ Pulsazione di risonanza} \quad (6)$$

$$Q = \frac{\omega_n M}{D} \text{ Fattore di qualità} \quad (7)$$

La funzione di trasferimento del sistema, mediante la quale è possibile dedurre il comportamento, si ottiene passando al dominio di Laplace:

$$\frac{x(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{D}{M}s + \frac{K}{M}} = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} \quad (8)$$

Dove $x(s)$ e $a(s)$ sono rispettivamente le trasformate di Laplace dello scostamento $x(t)$ e dell'accelerazione $a(t)$, variabili nel tempo. In condizioni statiche ($s = 0$) si ottiene la seguente relazione tra accelerazione e scostamento :

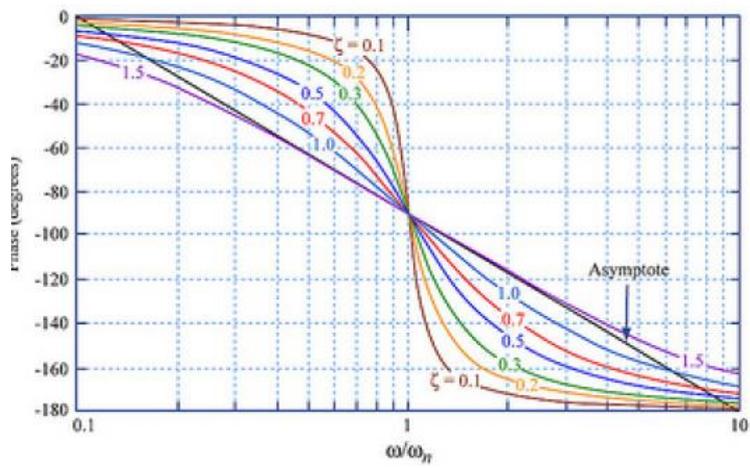
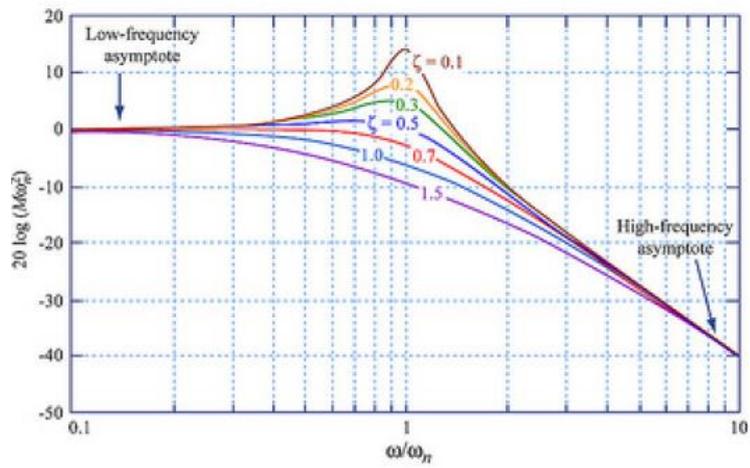
$$\frac{x_{static}}{a} = \frac{M}{K} = \frac{1}{\omega_n^2} \Rightarrow x_{static} = \frac{M}{K} \cdot a \quad (9)$$

Dove la costante M/K è definita sensibilità del trasduttore. Il comportamento dinamico del sistema è descrivibile mediante il diagramma di Bode che riporta nel dominio delle frequenze ($s = j2\pi f$) la funzione di trasferimento (8) al variare del parametro ξ (coefficiente di smorzamento). Ricordando che per un generico sistema del secondo ordine vale :

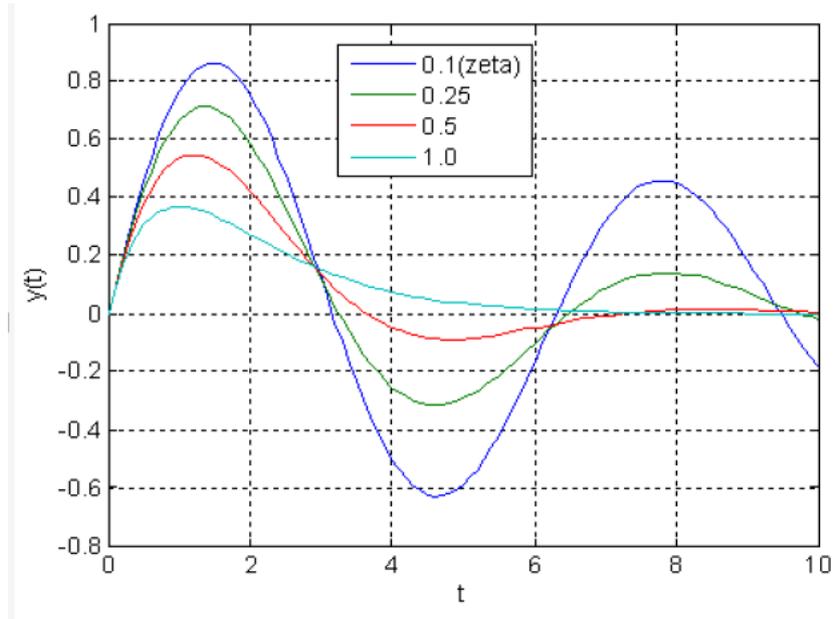
$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

Dove $X(s)$ è l'ingresso del sistema, mentre $Y(s)$ l'uscita del sistema. Dal confronto delle due funzioni di trasferimento quella relativa al sistema massa-molla-smorzatore (8) e quella di un generico sistema del secondo ordine (10) otteniamo la relazione:

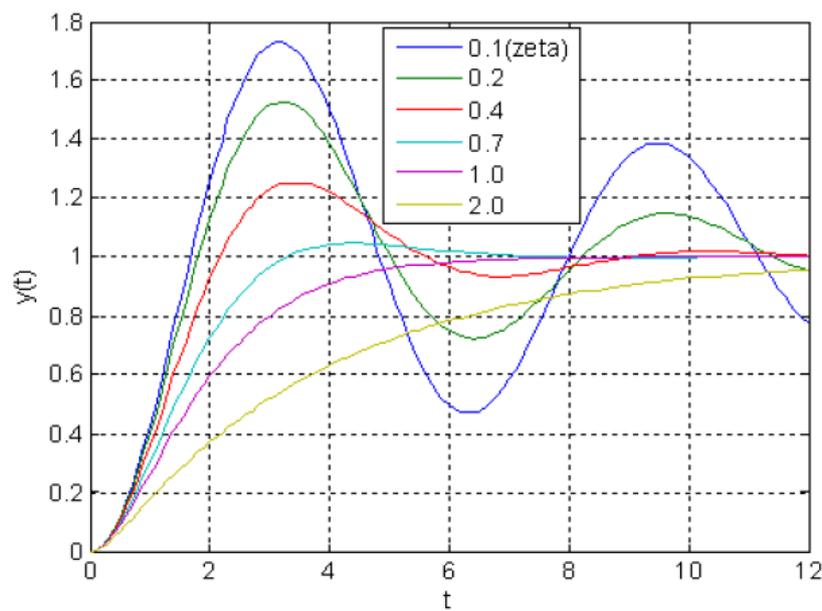
$$\xi = \frac{D}{2\sqrt{M \cdot K}} = \frac{1}{2Q} \quad (11)$$



a) Diagrammi di Bode



b) Risposta all'impulso



c) Risposta al gradino

Figura 2.5 Caratteristiche dinamiche e risposte ai segnali canonici

In figura 2.5 (b) è riportata la risposta del sistema all'impulso, sempre al variare di ξ ; tale risposta mostra come il sistema reagisce, oscillando, quando viene sottoposto a una variazione brusca, impulsiva dell'ingresso, come a esempio l'applicazione per una breve durata di una forza.

In figura 2.5 (c) è, invece, rappresentata la risposta del sistema al gradino, quando al sistema viene applicata una forza costante e tale forza viene mantenuta lasciando il tempo al

sistema di portarsi a regime. Caratteristica voluta per l'accelerometro è avere ξ prossimo a $1/\sqrt{2}$, in questo modo si massimizza la banda del sistema e si garantisce la più piccola distorsione di ampiezza possibile, evitando allo stesso modo fenomeni oscillatori indesiderati nelle risposte agli stimoli esterni. Per avere una sensibilità del trasduttore elevata servirebbe una massa grande, tuttavia ciò non è compatibile con la condizione di smorzamento e la pulsazione di risonanza, che garantisce una banda larga del sistema se la massa è piccola, quindi serve trovare dei compromessi fortemente influenzati dalla tecnologia costruttiva e dal processo di fabbricazione adottato per il sensore. Le prestazioni degli accelerometri sono, inoltre, limitate dal movimento termico della massa di prova. In accordo con le leggi della termodinamica, l'energia termica di un sistema in equilibrio è $k_b \cdot T/2$ per qualsiasi modalità di immagazzinamento dell'energia, dove k_b è la costante di Boltzmann, e T è la temperatura. Una densità spettrale equivalente di accelerazione, il cosiddetto rumore totale equivalente d'accelerazione (*Total Noise Energy Acceleration*) può essere calcolato, ed è dato da:

$$TNEA = \sqrt{\frac{4 \cdot k_b \cdot T \cdot \omega_n}{Q \cdot M}} \quad (12)$$

dove Q è il fattore di qualità e ω_n è la frequenza di risonanza del sistema massa-molla-smorzatore. Quindi si osserva che per misurare basse accelerazioni abbiamo bisogno di grandi masse ed elevato fattore di qualità.

4.2. Tipologie di accelerometri

4.2.1. Accelerometri piezoresistivi

Usano la flessione delle strutture sospese, *cantilever*, in cui la massa sismica (*proof-mass*) è sorretta da una barra di sospensione ancorata a una estremità alla struttura fissa di riferimento, per misurare la deformazione mediante estensimetri piezoresistivi. Essi grazie alla capacità di variare la propria resistività se soggetti ad una deformazione fisica, consentono di tradurre la deformazione subita dai supporti della massa di prova in una grandezza elettrica misurabile.

4.2.2. Accelerometri a effetto tunnel

Si basano sul legame esistente tra la corrente di *tunneling* che si instaura tra due elettrodi metallici e la loro distanza. La corrente di *tunneling* risulta essere fortemente legata alla distanza tra gli elettrodi metallici e la relazione ricavata da Simmons mette in luce tale legame:

$$I_{tun} = V_{tun} e^{-\alpha x_{tun} \sqrt{\phi}} \quad (13)$$

dove V_{tun} è la tensione di *tunneling*, ovvero la differenza di potenziale tra i due elettrodi, ϕ l'altezza effettiva della barriera di potenziale, x_{tun} la distanza tra i due elettrodi metallici e $\alpha = 1.025 A^{-1} eV^{-1/2}$.

Questo risultato è sfruttato nei accelerometri a effetto *tunnel* dove una corrente di *tunneling* viene fatta scorrere tra due elettrodi metallici realizzati, rispettivamente, sulla massa di prova e sulla struttura fissa sottostante. Uno spostamento della massa di prova rispetto alla struttura fissa produrrà una variazione della corrente che risulterà essere legata allo spostamento e quindi all'accelerazione esterna a cui è soggetto il dispositivo. Questo tipo di accelerometri possono raggiungere una sensibilità elevata, tuttavia livelli di rumore a bassa frequenza sono meno favorevoli e la richiesta di una rigorosa retroazione continua riduce la banda utile.

4.2.3. Accelerometri risonanti

Presentano un principio di funzionamento simile a quelli piezoresistivi, solo che la misura della deformazione della sospensione tramite gli estensimetri è sostituita dalla misura tramite variazioni della frequenza di risonanza di opportune barre risonanti connesse o integranti nella struttura. Lo spostamento della massa sismica, dovuta all'applicazione di un'accelerazione esterna, viene trasdotto in un segnale elettrico misurabile mediante l'impiego di una microstruttura mobile posta in oscillazione da un opportuno sistema di eccitazione. Lo spostamento della massa si traduce in una variazione della frequenza di risonanza della struttura vibrante; variazione, che risulta essere funzione dell'entità dello spostamento, e quindi dell'accelerazione esterna. Pertanto, rilevando la nuova frequenza di oscillazione del risonatore è possibile misurare l'accelerazione agente sul dispositivo. Un importante vantaggio è che la frequenza di risonanza può essere direttamente convertita in un segnale digitale.

4.2.4. Accelerometri termici

Usano al posto di una massa solida un gas, che viene riscaldato da un elemento riscaldante. Il gas è racchiuso in una cavità dotata di sensori termici (termo-pile). L'accelerazione causa uno spostamento della bolla di gas caldo che viene rilevata dai sensori termici. Questi accelerometri, detti MEMSIC, fanno parte della categoria dei *Micro-Machined Accelerometers* e presentano molti vantaggi, tra cui la resistenza agli shock e la minor usura nel tempo, dovute al fatto che non sono presenti elementi meccanici mobili all'interno del dispositivo.

4.2.5. Accelerometri capacitivi

Sfruttano come principio, per il rilevamento dello spostamento della massa di prova, la variazione della capacità elettrica di un condensatore, associata alla variazione della distanza tra le sue armature. La massa stessa, realizzata con materiale conduttivo, costituisce un'armatura del condensatore, l'altra, o le altre due (se costruito con tecnologia differenziale), sono invece fisse alla struttura del dispositivo. La massa viene tenuta sospesa grazie ad un elemento elastico, in modo che le armature non si tocchino. Uno schema funzionale dell'accelerometro capacitivo è riportato in figura 2.6.

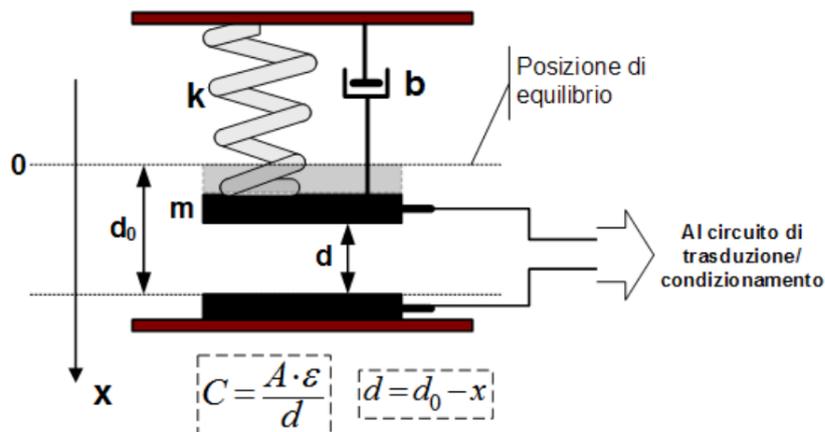


Figura 2.6 Schema funzionale del accelerometro capacitivo

La massima deflessione, x , che la massa può subire è pari alla distanza tra le armature in condizione di equilibrio d_0 (con forze applicate nulle), infatti uno scostamento pari a $x = d_0$ causa il contatto tra l'armatura mobile e quella fissa. Un apposito circuito infine genera un segnale elettrico proporzionale alla capacità del condensatore e quindi all'accelerazione. Questi sensori sono adatti alla misura di accelerazioni statiche; sono poco sensibili alle variazioni di temperatura, hanno un'elevata sensibilità, alte prestazioni, bassa dissipazione di potenza e un costo molto basso. La tecnologia capacitiva tuttavia, a differenza di quello che avviene per sensori basati su altre tecnologie, rende questi sensori suscettibili alle interferenze elettromagnetiche; una possibile soluzione consiste nell'utilizzare un'adeguata schermatura.

Gli accelerometri MEMS misurano accelerazioni, tipicamente in unità di g , dove $1g$ è l'accelerazione dovuta alla gravità della Terra ed è pari in prima approssimazione a 9.8 m/s^2 .

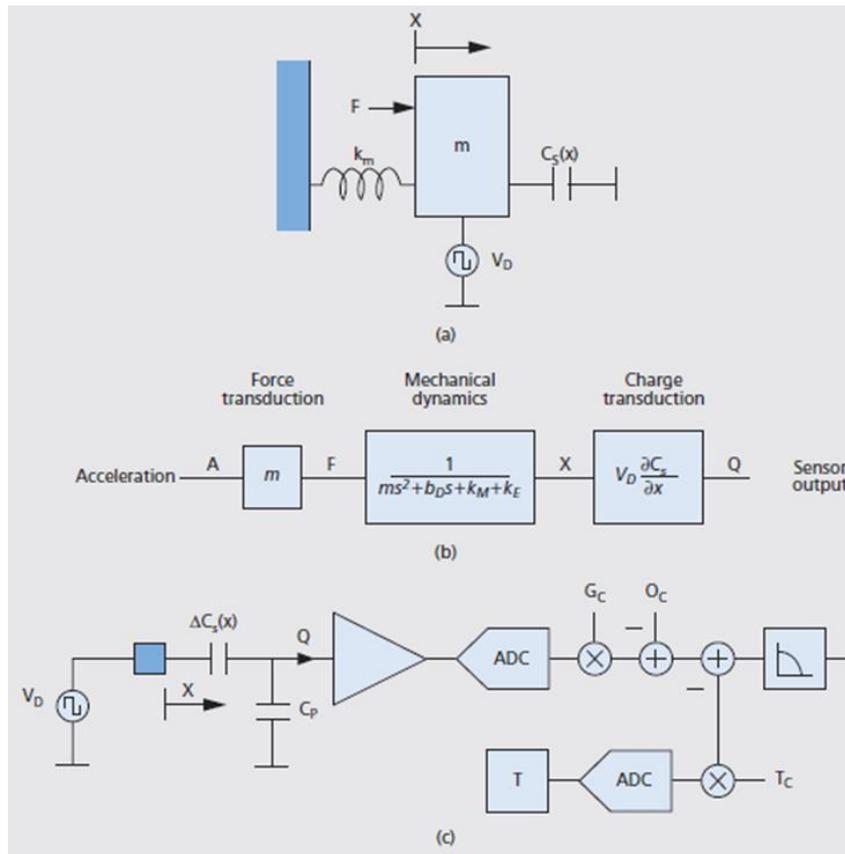


Fig 2.7 Configurazione di un accelerometro: a) schema elettromeccanico; b) modello equivalente del sistema; c) schema semplificato dell'interfaccia del sensore.

La figura 2.7 a) rappresenta un accelerometro costituito da una massa sospesa a un telaio fisso tramite una molla, dove le forze agenti aumentano grazie all'accelerazione lineare della massa. L'accelerazione può essere generata dal movimento del sensore o dalla gravità.

La figura 2.7 b) evidenzia come la trasduzione dell'accelerazione in forza agente sulla massa di prova avviene grazie alla massa stessa. Ciò si deduce dalla seconda legge di Newton : $F = m \cdot a$. Più grande è la massa, più grande sarà la forza per una data accelerazione. Misurare l'accelerazione grazie alla gravità richiede una misura a DC, quindi di solito gli accelerometri lavorano a frequenze lontane dalla risonanza. La sensibilità meccanica a DC è proporzionale a $m/(k_M + k_E)$, che è la radice inversa della frequenza naturale. Tipicamente gli accelerometri destinati al largo consumo hanno frequenza naturale dell'ordine di qualche kilohertz (kHz), quindi per ottenere una accelerazione $1g$ a DC (corrente continua) abbiamo bisogno di uno spostamento di decine di nanometri (nm). Per una data sensibilità, è utile

massimizzare la massa e la rigidità della molla per poter discriminare le forze dovute all'accelerazione da quelle parassite dovute ad altri fattori, come lo stress termico.

La figura 2.7 c) illustra uno schema semplificato dell'interfaccia del sensore. Il flusso netto di carica nell'amplificatore è direttamente proporzionale all'accelerazione più una minima tensione di offset. Siccome la capacità è quasi-statica, la misura dell'accelerazione richiede uno stimolo AC (corrente alternata). In una misura con configurazione a tempo discreto, una tensione di pilotaggio, V_D , applicata alla massa genera un flusso di cariche, che vengono accumulate dall'amplificatore e digitalizzate dall'ADC (*analog to digital converter*). Questa configurazione ha il vantaggio che non c'è bisogno di un filtro *anti-aliasing* essendo il sistema a tempo discreto dall'inizio alla fine. Inoltre è possibile attenuare il rumore elettronico a basse frequenze e l'offset tramite tecniche incorporate nella configurazione a tempo discreto. In seguito alla digitalizzazione, il guadagno e l'offset del sensore sono corretti dai fattori G_C e O_C . In aggiunta, è spesso utile compensare l'offset tramite la temperatura per evitare la deriva termica di primo ordine usando il fattore T_C . Alla fine un filtro passa basso limita il rumore nella banda del segnale avvicinandosi alla velocità dei dati in uscita di qualche kilohertz e alla misura del tempo.

5. Giroscopio

Il giroscopio è un dispositivo in grado di rilevare una velocità angolare o un angolo di rotazione. Queste due grandezze possono essere dedotte attraverso diversi principi fisici. In base ai principi fisici si possono definire tre principali categorie di giroscopi:

- puramente meccanici, che sfruttano l'effetto giroscopico;
- ottici, che si basano sull'effetto Sagnac;
- vibranti, realizzati con tecnologia MEMS. Essi sfruttano le accelerazioni di inerzia, che nascono per effetto del moto del sensore rispetto a un sistema di riferimento non inerziale² (nella fattispecie l'accelerazione di Coriolis). [7]

² Sistema di riferimento (sdr) non inerziale è un sdr in cui un corpo soggetto a una risultante di forze nulla si muove comunque di moto uniforme accelerato.

5.1. Giroscoopi vibranti

I giroscoopi inerziali MEMS sono costituiti da masse vibranti che sfruttano le accelerazioni di inerzia che nascono per effetto del moto del sensore rispetto a un sistema di riferimento non inerziale (accelerazione di Coriolis). Si consideri, infatti, un corpo di dimensioni trascurabili dotato di massa, m , in moto con velocità costante, \vec{V}_r , relativa ad un sistema non inerziale (Fig. 2.8); se il sistema di riferimento relativo è, a sua volta, in moto con velocità angolare ω , rispetto a un sistema di riferimento inerziale, sul corpo nasce un'accelerazione di Coriolis data da:

$$\vec{a}_{\text{Coriolis}} = 2 \times \Omega \times \vec{V}_r$$

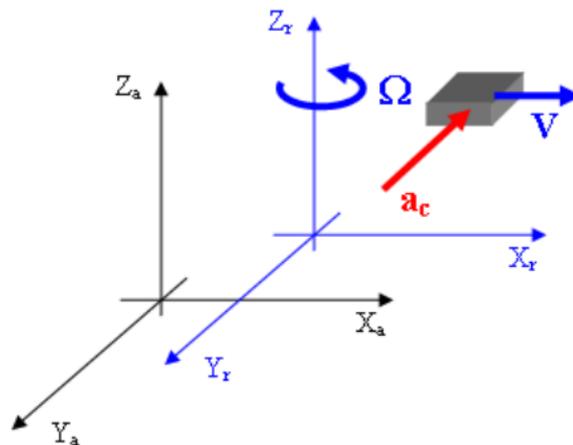


Figura 2.8 Accelerazione di Coriolis che nasce su un corpo di massa, m , in moto con velocità costante rispetto a un sistema di riferimento non inerziale

I giroscoopi MEMS inerziali possono essere di due tipi:

1. Giroscoopi inerziali MEMS traslazionali;
2. Giroscoopi inerziali MEMS rotazionali.

5.1.1. Giroscoopi inerziali MEMS traslazionali

Il sistema è costituito da due masse congiunte tramite un elemento elastico; sottoponendo il sistema all'azione di una forzante in direzione x e alla rotazione imposta da una velocità angolare lungo l'asse z (perpendicolare al piano $x - y$), si manifesta la comparsa di

un'accelerazione diretta ortogonalmente alla traiettoria (per cui in direzione y), che è appunto l'accelerazione di Coriolis (figura 2.9).

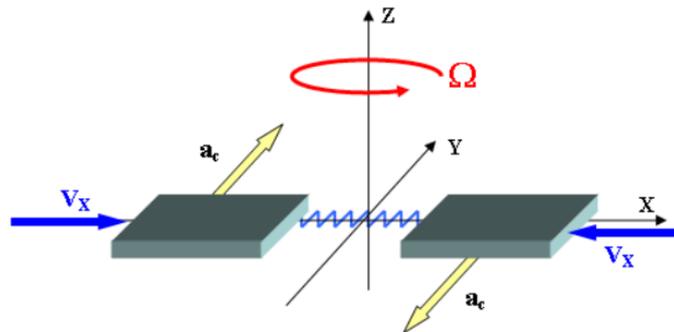


Figura 2.9 Principio di funzionamento di un giroscopio traslazionale

La direzione determinata dall'asse x è detta di *driving*, poiché lungo di essa si sviluppa l'attuazione del giroscopio, mentre la direzione dell'asse y è chiamata di *sensing*, dato che permette la rilevazione della velocità angolare Ω di rotazione attorno all'asse z . Tale rivelazione è basata sulla misura degli spostamenti che avvengono appunto lungo il *sense*, in conseguenza del moto di attuazione lungo il *drive* e della velocità angolare attorno all'asse z . Se il moto di attuazione è armonico, lo sono anche le accelerazioni delle masse in direzione di *sense* poiché dipendono dalla velocità relativa v che è, appunto, armonica. Questo comporta un moto vibratorio sia lungo x che lungo y , moto che in prima approssimazione può essere ritenuto disaccoppiato; entrambe le direzioni, quindi, presentano un proprio modo di vibrare e sono dotate di pulsazione propria. Il funzionamento del sensore è basato su interfacce di tipo capacitivo: pettini interdigitati (Comb Fingers) posti lungo l'asse di attuazione consentono il moto delle masse in tale direzione, mentre pettini paralleli (Parallel Plates) consentono il moto lungo l'asse di rilevazione; si parla, allora, di attuazione elettrostatica e di rilevazione capacitiva differenziale.

5.1.2. Giroscopi inerziali MEMS rotazionali

La struttura è composta da tre masse: una detta di *drive* (la massa esterna), e due dette di *sense* (le masse interne). Sono presenti diversi elementi elastici:

- molle di *drive*: collegano la massa di *drive* al substrato;
- molle di *sense*: collegano le masse di *sense* alla massa di *drive*.

La massa di *drive* viene fatta ruotare con velocità angolare Ω attorno all'asse z normale al piano della struttura, che rappresenta l'asse di attuazione, generando un momento M_z sulla massa mobile; di conseguenza, le due masse di *sense* ruotano rispetto all'asse z e traslano in y ; la presenza di una velocità angolare Ω_x intorno all'asse x (incognita da rilevare) porta alla formazione di due forzanti di Coriolis F_{Cor} (Fig 2.9) agenti, con verso opposto, sulle due masse di *sense*, e producono sulle stesse masse un'oscillazione ϑ_y . La misura della velocità angolare ω_y si ricava dall'entità delle oscillazioni prodotte in ϑ_y da tali forzanti di Coriolis.

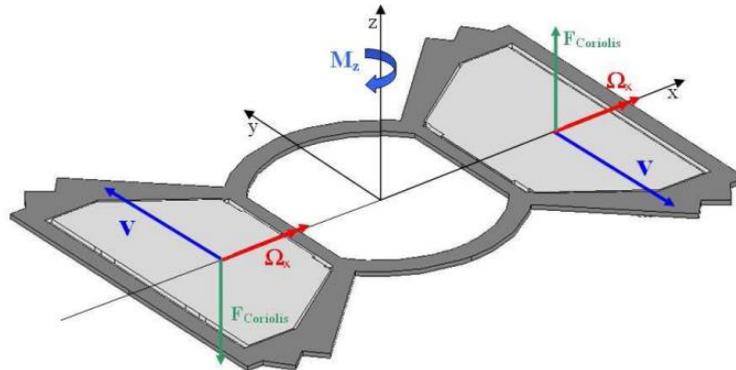


Figura 2.9 Principio di funzionamento di un giroscopio rotazionale

Analogamente al giroscopio traslazionale prima descritto, il funzionamento del sensore rotazionale è basato su interfacce di tipo capacitivo: Comb Fingers posti lungo l'asse di attuazione consentono il moto delle masse in tale direzione, mentre Parallel Plates consentono il moto lungo l'asse di rilevazione; si parla, allora, di attuazione elettrostatica e di rilevazione capacitiva differenziale. Un'unità di misura comune a questi dispositivi sono i gradi per secondo (dps degrees per second). Essi operano, come sopra descritto, in base al principio di rilevamento dell'accelerazione di Coriolis agente su una massa di prova vibrante (massa di *drive*) proporzionalmente alla velocità di rotazione lungo l'asse ortogonale all'asse vibratorio. Misurando l'accelerazione di Coriolis, la velocità di rotazione può essere misurata, purché sia nota l'ampiezza della velocità della massa di prova. Quindi un giroscopio nel rispetto di questo metodo deve condurre la massa di prova in oscillazione lungo un asse, regolare l'ampiezza in modo tale che la massa possieda una velocità stabile e sentire il corrispondente movimento della stessa massa lungo un asse ortogonale. I giroscopi inerziali MEMS rotazionali sono inoltre dispositivi AC, quindi sia un'interfaccia del sensore a tempo continuo sia a tempo discreto è adatta.

polarizzazione fissa, V_B , alla massa. Quindi, un metodo di misura a tempo continuo è una scelta naturale per questo tipo di giroscopio, anche se sono possibili anche metodi a tempo discreto.

Il modello equivalente del sistema rappresentato in Fig 2.10 b) prevede due sottosistemi accoppiati, uno per il pilotaggio (*driving*) e l'altro per il *sensing*. Il sistema di pilotaggio oscilla in risposta all'applicazione di una tensione, V_D , e crea una carica in uscita, Q_D . Un anello oscillatore di pilotaggio misura e amplifica Q_D fornendo un feedback a V_D , con uno sfasamento di 90° a causa dell'oscillazione prolungata, come mostrato in figura 2.10 c). Un controllo automatico del guadagno regola l'ampiezza meccanica per evitare danni al dispositivo MEMS e per assicurare una sensibilità stabile.

La velocità di pilotaggio genera un'accelerazione di Coriolis proporzionale alla velocità rotazionale applicata (data da $2sY_D \times \Omega$ nel dominio delle frequenze, dove Y_D rappresenta l'ampiezza meccanica, Ω è la velocità rotazionale e $s = j\omega$). Alcune parti dell'azionamento sono collegate direttamente agli assi di *sense* a causa dello squilibrio meccanico. Questo genera un elemento passivo indesiderato noto come *quadratura* a causa del suo sfasamento di 90° rispetto al segnale desiderato in uscita. L'accelerazione dovuta a questo termine indesiderato è proporzionale all'accelerazione di pilotaggio (data da $\varepsilon s^2 Y_D$ nel dominio della frequenza, dove ε rappresenta il grado di accoppiamento *drive-sense*). L'accelerazione netta, includendo entrambi i componenti sia Coriolis sia la quadratura, agisce sulla massa lungo l'asse di *sense* per generare un segnale modulato in ampiezza, che si manifesta come un flusso di carica nella capacità. La risoluzione capacitiva è molto bassa, determinando cambiamenti di qualche aF per 1 dps di velocità rotazionale, quindi la presenza del rumore è critica in questa situazione. Il sensore capacitivo è generalmente configurato a ponte cosicché la carica netta in uscita sia proporzionale alla velocità di rotazione senza nessun offset sistematico. La componente di quadratura può essere molto più grande del segnale di Coriolis, quindi bisogna essere ridotta. Un possibile approccio iniziale è ridurre la quadratura tramite un assetto passivo, dove una carica opposta proporzionale all'uscita dell'amplificatore *drive sense* è iniettata all'ingresso dell'amplificatore di *sense* mediante una rete programmabile di capacità. La componente residua di quadratura rimasta in seguito alla compensazione è respinta grazie a un demodulatore, che opera in fase con il segnale di Coriolis (a 90° di sfasamento rispetto alla quadratura del segnale). Il segnale risultante in banda base trasporta l'informazione della velocità angolare in DC ed è digitalizzata dall'ADC. Il guadagno e l'offset sono opportunamente scelti per normalizzare la sensibilità. L'offset del giroscopio subisce anche una compensazione lineare di temperatura. Finalmente, il segnale è filtrato per eliminare componenti indesiderati residui in seguito alla demodulazione e limitare la banda del rumore, in accordo con la frequenza desiderata dei dati in uscita.

CAPITOLO 3

Sensori di forza

1. Tecniche di trasduzione

Tra tutti i sensori e trasduttori¹ disponibili sul mercato, il sensore di forza è uno tra i sensori più importanti e usati. Negli ultimi decenni sono state sviluppate diverse tecniche per misurare la forza e la pressione, facilmente riscontrabili nella letteratura. Molto spesso la forza viene misurata in maniera indiretta attraverso variazioni, in lunghezza o altezza, di strutture meccaniche microscopiche interne al sensore. Il modo in cui si deforma una struttura meccanica, come può essere un elemento molla, una membrana oppure una trave, non dipende solo dalla loro forma geometrica, ma dipende soprattutto dalle proprietà meccaniche del materiale (modulo di Young E , coefficiente di Poisson ν , il carico meccanico, la distribuzione delle tensioni meccaniche σ ecc.), dalla modalità di ancoraggio al mondo circostante (figura 3.1), e dalle condizioni dell'ambiente (pressione, umidità, accelerazione, rotazione ecc.). La variazione geometrica è successivamente misurata tramite diverse tecniche di trasduzione come la trasduzione elettrostatica, piezoelettrica, piezoresistiva o ottica, che convertono l'informazione del segnale nella forza, che desideriamo calcolare, mediante processi di calibrazione. La geometria e le proprietà fisiche dei trasduttori definiscono la risposta statica e dinamica, ma anche la risoluzione e la larghezza di banda. [8]

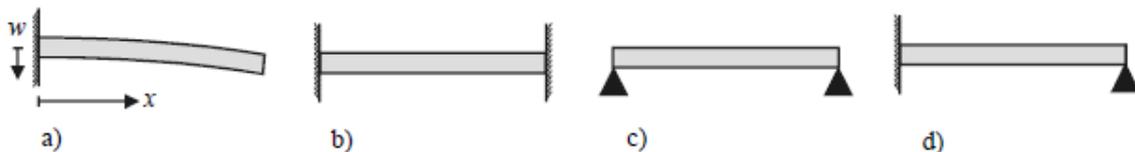


Figura 3.1 Quattro modi diversi di ancorare una trave: a) trave incastrata a un estremo b) trave incastrata agli estremi c) trave appoggiata agli estremi d) trave incastrata a un estremo e appoggiante all'altro

¹ Trasduttore: è un dispositivo in grado di rilevare una grandezza fisica di tipo qualsiasi (termica, luminosa, magnetica, meccanica, chimica ecc) e di trasformarla in una grandezza di altro tipo, generalmente elettrica (tensione o corrente). [e]

1.1.Estensimetro²

Una delle tecniche di trasduzione più note usate per trasdurre la variazione geometrica di una struttura meccanica è l'estensimetro. La resistenza elettrica di un resistore (pezzo di metallo) dipende dalla sua forma e dimensioni. Per un'asta con sezione di taglio S e lunghezza l , la resistenza R è data dall'espressione :

$$R = \frac{l}{\lambda S} \quad (1)$$

dove λ è la conduttività specifica del materiale.

Come conseguenza dell'applicazione di un carico esterno la resistenza cambia le sue dimensioni, sia la lunghezza sia la sezione. La variazione della resistenza è data dalla relazione :

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu)\varepsilon \quad (2)$$

dove ν è il coefficiente di Poisson. Da questa variazione, in seguito, è possibile ricavare il nostro misurando, ovvero la forza.

1.2.Trasduzione elettrostatica

Generalmente quando due corpi conduttivi elettricamente (elettrodi) sono avvicinati, essi formano una condensatore. Variando la geometria cambia anche la loro capacità. Questa variazione può essere misurata mediante una variazione di tensione oppure attraverso cambiamenti nella capacità (per esempio incorporando la struttura in un circuito oscillatore in modo tale che la frequenza delle oscillazioni diventino una misura della distanza relativa tra i due corpi).

1.3.Trasduzione piezoelettrica

Si basa sulla variazione geometrica dei materiali. Quando usiamo materiali piezoelettrici, la trasduzione avviene all'interno del materiale. L'applicazione di una tensione sopra un *film* di materiale piezoelettrico si traduce in una caduta di tensione elettrica lungo lo spessore dello strato. In questo caso il cristallo deformato regge il carico, ma anche fornisce il segnale d'uscita. Sistemi più complessi incorporano un *feedback* elettrico per bilanciare la forza esterna tramite una controforza uguale, ma diretta nel verso opposto. Il vantaggio principale di questa configurazione è la possibilità di omettere l'elemento molla, risolvendo così problemi come la linearità, il *creep* e l'isteresi causati dalla molla stessa.

² Estensimetro: è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche. [f]

Tuttavia questo sistema è impiegato per la misura di piccole forze a causa della limitata controforza, che può essere esercitata senza compromettere l'integrità del sensore. Anche se la trasduzione piezoelettrica è spesso usata in sensori e attuatori microscopici, è meno spesso usata nei sensori MEMS a causa della mancanza di materiali, che possono essere depositati con qualità e durezza sufficienti.

1.4. Trasduzione ottica

In molti casi potrebbe essere vantaggioso non avere nessun segnale elettrico in ingresso o in uscita dal sensore (per esempio quando lavoriamo in ambiente con elevati campi elettromagnetici o esplosivi). In queste circostanze la lettura ottica potrebbe essere l'unica soluzione.

I segnali ottici possono essere ricavati in base agli effetti *tunnel* o effetti di interferenza.

1.4.1. Effetto tunnel

L'effetto *tunnel* sfrutta le correnti di *tunnel*. In questa tecnica le cariche elettriche diffondono nello spazio non conduttivo, tra un elettrodo e un altro, creando una specie di *tunnel*. L'effetto tunnel accade se gli spazi da percorrere sono piccoli, dell'ordine dei nanometri, e le correnti dipendono esponenzialmente dalla distanza secondo la relazione:

$$I_{tun} = V_{tun} e^{-\alpha x_{tun} \sqrt{\phi}} \quad (3)$$

dove V_{tun} è la tensione di *tunneling*, ovvero la differenza di potenziale tra i due elettrodi, ϕ l'altezza effettiva della barriera di potenziale, x_{tun} la distanza tra i due elettrodi metallici e $\alpha = 1.025 A^{-1} eV^{-1/2}$.

2. Sensori di forza

In letteratura, i sensori di forza sono classificati in due categorie:

- con scala di misura macroscopica;
- con scala di misura microscopica.

Nella scala macroscopica, i schemi di trasduzione della posizione sono molto flessibili, infatti estensimetri, sensori a effetto Hall, sensori capacitivi, encoder ottici ecc. possono essere facilmente integrati nei sensori di forza. In questo campo, i ricercatori si preoccupano di più della funzionalità e della capacità di carico piuttosto che della sensibilità del sensore. [9]

Nella scala microscopica, invece, solo alcuni approcci per la misura della posizione sono ammessi e il costo di fabbricazione è alto. Nonostante questi svantaggi, i sensori di forza

basati sulla tecnologia MEMS sono ampiamente studiati dai ricercatori per la loro potenziale applicazione in settori come la biomeccanica, la microrobotica, nei sistemi di *imaging* ecc.. Sono stati sviluppati sensori di forza MEMS usando la configurazione capacitiva *comb-drive*, sensori di forza MEMS a tre assi basati sugli effetti piezoelettrici, sensori di forza MEMS ottici usando opportuni meccanismi per la micromanipolazione ecc..

2.1. Sensore di forza a doppio range di misura

In questo elaborato è stato deciso di concentrarsi su un particolare e innovativo sensore di forza uniassiale basato sulla tecnologia MEMS. Il sensore è configurato in maniera tale da integrare una scala con doppio *range*; quello microscopico è impiegato nelle misure di forza precise, mentre quello macroscopico è usato per le misure di forze su larga scala.

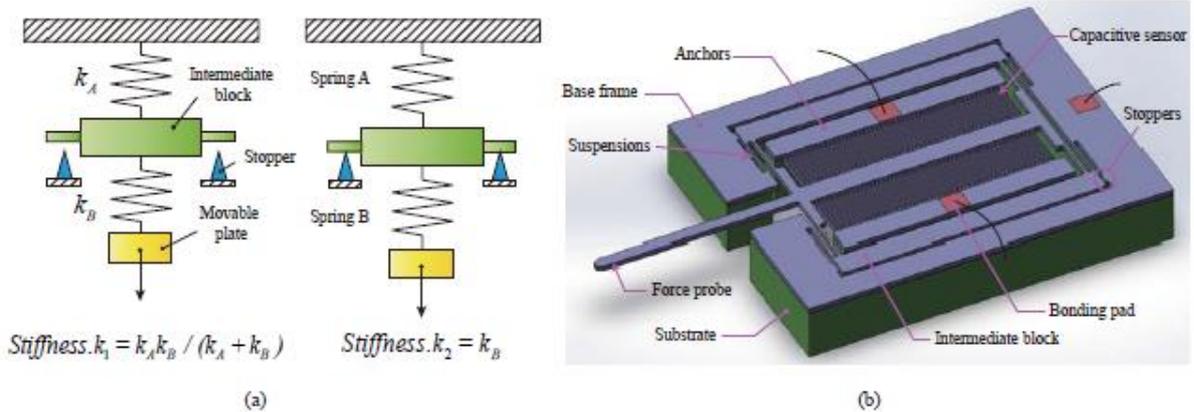


Figura 3.2 a) Schema del sensore b) Modello solido del sensore

Nella figura 3.2 a) è rappresentato lo schema del sensore. Il suo design è tale da permettere due fasi di risoluzione all'interno dello spazio di lavoro. La prima fase parte dalla posizione di equilibrio (punto originale) fino alla posizione dove il blocco intermedio tocca i due appoggi. In questa fase, la rigidezza del piatto mobile può essere calcolata tramite l'espressione:

$$k_1 = \frac{k_a k_b}{(k_a + k_b)} \quad (4)$$

dove k_a e k_b sono rispettivamente la rigidezza complessiva dei punti di flessione A e B .

La seconda fase inizia dalla posizione dove il blocco intermedio tocca gli appoggi e finisce quando il piatto mobile raggiunge il suo limite lineare di movimento. La rigidezza del piatto in questa seconda fase è k_2 , ed è uguale a k_b . Nell'intero processo, il piatto mobile possiede due successivi *range* di movimento. In ogni *range* di movimento, il valore della rigidezza è

diverso, ma costante. Una bassa rigidezza è usata per intervalli piccoli e misure di forza con ottima risoluzione, mentre un'elevata rigidezza per intervalli ampi e misure di forza con risoluzione grossolana.

La figura 3.2 b) illustra un modello solido del sensore. E' prodotto su un wafer SOI (*Silicon-On-Insulator*) con uno strato del dispositivo di $50\ \mu\text{m}$, uno strato di ossido sepolto di $1\ \mu\text{m}$, e uno strato di maneggio di $450\ \mu\text{m}$, allo scopo di semplificare il processo di fabbricazione. Tutte le strutture del sensore incluse le molle e i condensatori sono ricavati e incisi sullo strato del dispositivo.

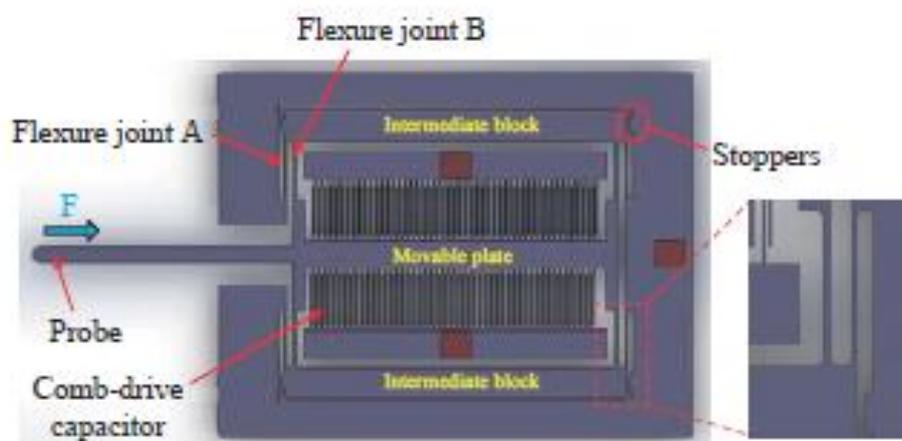


Fig 3.3 Vista dall'alto del sensore e zoom sulle giunzioni flessibili.

Nella figura 3.3 è rappresentata una vista dall'alto del sensore. La sonda, collegata ai piatti mobili in configurazione a pettine, fuoriesce dal sensore lavorando da interfaccia per le forze esterne. I piatti mobili sono ancorati a quattro travi flessibili (giunzione flessibile *B*), che sono connesse al blocco intermedio in una disposizione simmetrica. Il blocco intermedio è, a sua volta, sostenuto da altre quattro travi flessibili (giunzione flessibile *A*), che sono collegate al telaio. Questa configurazione tende a minimizzare il movimento parassita dei piatti mobili, come anche la linearità tra la forza applicata e lo spostamento derivante dall'applicazione di una forza esterna incognita. In aggiunta ci sono anche due appoggi posizionati opportunamente tra il blocco intermedio e il telaio; la distanza scelta tra i due è di $2\ \mu\text{m}$, rispettando i vincoli sulle dimensioni esterne e l'intervallo lineare del movimento flessionale. Inoltre i condensatori in configurazione *comb-drive* sono impiegati per misurare lo spostamento dei piatti mobili.

Il corpo del sensore consiste in due stadi mobili (il blocco intermedio e i piatti mobili); ogni stadio mobile è sospeso a un gruppo di giunzioni flessibili (A e B). La rigidità complessiva dei due gruppi di giunzioni flessibili può essere misurata usando la teoria lineare delle travi:

$$k_a = 4E\omega_a \left(\frac{t_a}{l_a}\right)^3 \quad (5)$$

$$k_b = 4E\omega_b \left(\frac{t_b}{l_b}\right)^3 \quad (6)$$

dove E è il modulo di Young del materiale scelto, l_i , ω_i e t_i ($i = a, b$) sono rispettivamente la lunghezza, la larghezza e lo spessore rispettivamente dei due gruppi di giunzioni flessibili.

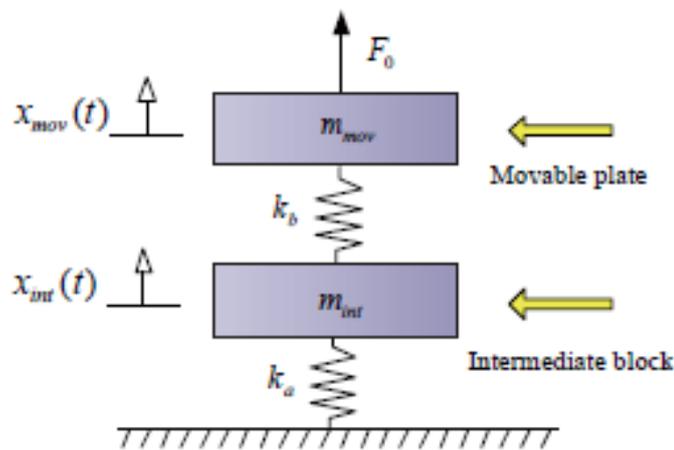


Figura 3.4 Modello dinamico del sensore di forza

Secondo l'analisi cinematica, la rigidità dei piatti mobili può essere calcolata nella prima fase secondo la :

$$k_1 = \frac{k_a k_b}{(k_a + k_b)} \quad (7)$$

Mentre la rigidità dei piatti mobili nella seconda fase è data da:

$$k_2 = k_b \quad (8)$$

Dato che i due stadi mobili sono connessi in serie, la relazione $k_1 < k_2$ è valida per ogni valore arbitrario di k_a e k_b . Dopo aver ottenuto la rigidità dei piatti mobili, la forza applicata può essere calcolata tramite le relazioni:

$$F = k_1 d \quad \text{quando } d \leq d_0 \quad (9)$$

$$F = k_1 d_0 + k_2 (d - d_0) \quad \text{quando } d > d_0 \quad (10)$$

dove d rappresenta lo spostamento dei piatti mobili rispetto alla posizione di equilibrio e d_0 è lo spostamento del blocco intermedio fino a quando non tocca gli appoggi.

Quindi, denominata la risoluzione dello spostamento misurato Δ , la risoluzione della forza del sensore sarà $k_1\Delta$ nella prima , e $k_2\Delta$ nella seconda fase. Un' altra misura d'interesse è la larghezza di banda del sensore, che incide significativamente sulle prestazioni dinamiche del sensore di forza. La larghezza di banda è generalmente delimitata da una frequenza di risonanza del primo ordine. Inoltre, la frequenza naturale del corpo del sensore è calcolata per determinare la larghezza di banda del sensore. Rispetto al blocco intermedio e ai piatti mobili, la massa delle giunzioni flessibili è molto inferiore. Quindi, a scopo semplificativo, la massa delle giunzioni flessibile si trascura quando si conduce un analisi modale.

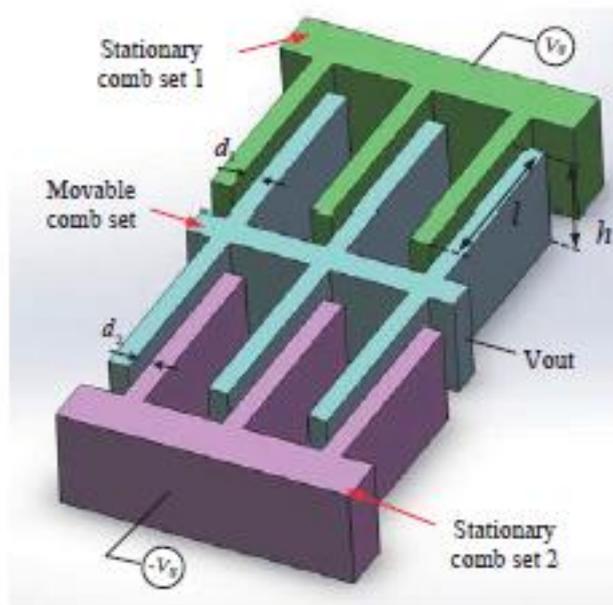


Figura 3.5 Simulazione modello dinamico del sensore

In figura 3.5 è raffigurato il modello dinamico semplificato dell'intero sistema di misura. Assumendo che, lo smorzamento interno del sistema, e l'influenza dei vincoli olonomi introdotto dagli appoggi sul blocco intermedio, possano essere trascurati, l'equazione differenziale che governa il movimento del sistema in condizione di oscillazione libera è data da:

$$\begin{bmatrix} m_{mov} & 0 \\ 0 & m_{int} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{mov}(t) \\ \ddot{x}_{int}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_a & -k_b \\ -k_b & k_a + k_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{mov}(t) \\ x_{int}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Per risolvere l'equazione del movimento, scriviamo la soluzione dello stato stazionario come:

$$X(t) = X \sin(\omega t + \varphi) = \begin{bmatrix} X_{mov} \\ X_{int} \end{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) \quad (12)$$

dove X_{mov} e X_{int} sono rispettivamente l'ampiezza dell'oscillazione/vibrazione dei piatti mobili e del blocco intermedio. Sostituendo l'equazione (12) in (11) si ottiene:

$$KX = \omega^2 MX \quad (13)$$

dove M e K sono rispettivamente la matrice delle masse del sistema e la matrice della rigidità. Moltiplicando entrambi i termini dell'equazione (13) per M^{-1} si ha:

$$M^{-1}KX = \omega^2 X \quad (14)$$

Sia $S = M^{-1}K$ e $\lambda = \omega^2$, l'equazione (14) può essere riscritta come:

$$(S - \lambda I) \cdot X = 0 \quad (15)$$

dove I è la matrice identità. Se esiste una soluzione diversa da zero allora si ha:

$$|S - \lambda I| = 0 \quad (16)$$

Espandendo l'equazione (16) in un'equazione polinomiale si ottiene:

$$\lambda^2 - (S_{11} + S_{22})\lambda + S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} = 0 \quad (17)$$

Siccome la matrice delle masse e la matrice della rigidità del sistema oscillante/vibrante sono definite positive, l'equazione (17) presenta due soluzioni positive. La frequenza naturale del sistema dinamico, f_1 e f_2 ($f_1 < f_2$) possono essere ricavate da:

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\pi\sqrt{\lambda_1} \\ & \quad (\lambda_1 < \lambda_2) \quad (18) \\ f_2 &= 2\pi\sqrt{\lambda_2} \end{aligned}$$

dove λ_1 e λ_2 sono le due soluzioni non negative dell'equazione (17). La larghezza di banda finale del sensore di forza è delimitata dalla frequenza naturale del primo ordine.

2.2. Trasduzione capacitiva

Nel design del sensore è stata usata la tecnica di trasduzione capacitiva, che presenta bassa potenza, basso rumore e ottime proprietà di sensibilità. Lo spostamento rilevato è poi convertito in informazioni riguardanti la forza attraverso un processo di calibrazione. Generalmente ci sono due configurazioni dei sensori capacitivi:

- *comb drive* laterali (sovrapponendo variazioni d'area);
- *comb drives* trasversali (variazioni di gap).

2.2.1. Comb drive laterale

Rispetto alla configurazione laterale, quella trasversale presenta maggiore sensibilità ma soffre anche di non linearità. Dato che desideriamo la linearità in questo tipo di applicazioni, il design proposto impiega un *comb drive* differenziale a tre piatti per semplificare il processo di fabbricazione e per incrementare la linearità. Il principio di funzionamento di questa configurazione è mostrata in figura 3.5. Consiste in due set di pettini fissi e uno mobile. Quando due segnali alternati, con la stessa ampiezza e fasi opposte, vengono applicati ai condensatori fissi, il segnale risultante in uscita può essere generato grazie a una relazione lineare con il segnale d'ingresso data da:

$$V_{out} = V_s \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \right) \quad (19)$$

dove C_1 e C_2 sono le rispettive capacità dei due condensatori.

Assumendo che l'effetto frangia possa essere trascurato, le due capacità sono determinate da:

$$C_1 = \frac{\varepsilon \cdot n \cdot hl}{d_1 + \Delta d} \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon \cdot n \cdot hl}{d_2 - \Delta d} \quad (21)$$

dove $\varepsilon = 8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ è la permittività dell'aria, n è il numero delle paia di condensatori, Δd è lo spostamento del set di pettini mobili causato da una forza esterna. Imponendo inizialmente $d_1 = d_2$, la linearità è mantenuta. Dall'equazione (19), il segnale in uscita risultante V_{out} è proporzionale allo spostamento dei piatti centrali:

$$V_{out} = - \left(\frac{V_s}{d_0} \right) \cdot \Delta d \quad (22)$$

dove $d_0 = (d_1 + d_2)/2$. Il segnale uscente è poi post-processato nella sezione di gestione ed elaborazione dei dati del dispositivo, per poi essere pubblicato sul display.

2.3. Metodi di lettura

Esistono due metodi di lettura molto comuni impiegati nelle applicazioni MEMS capacitive odierne:

- il primo approccio si basa sulla misura del tempo di scarica di un condensatore usando un resistore per determinare il tempo di scarica. Il tempo necessario per scaricare il condensatore carico è proporzionale alla sua capacità elettrica.
- il secondo metodo si basa sulla misura di un rapporto tra impedenze, dove due tensioni di eccitazione periodiche sfasate di 180° sono applicate alla coppia di condensatori. La risposta demodulata dell'elettrodo comune è proporzionale al rapporto tra le due capacità.

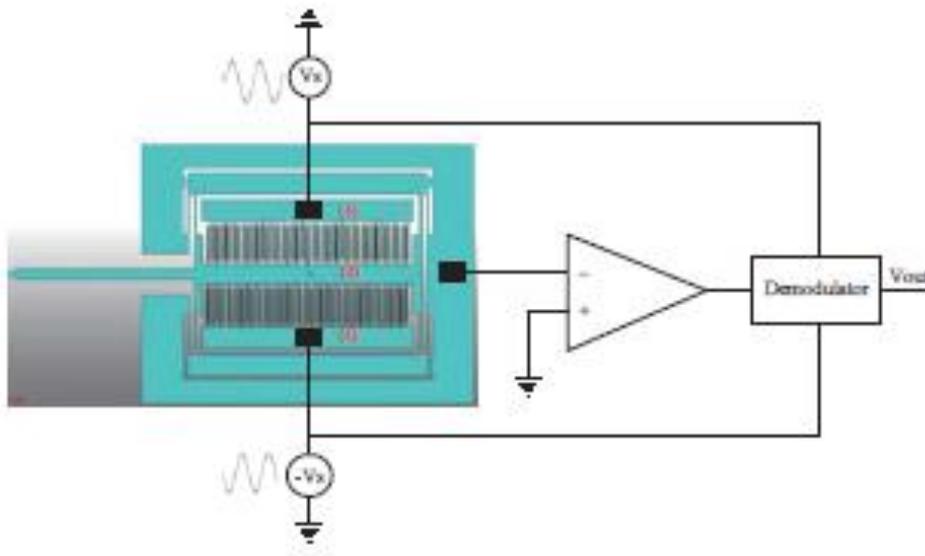


Figura 3.6 Schema dell'elettronica di lettura

La figura 3.6 raffigura il diagramma a blocchi della circuiteria di lettura del segnale in uscita. In aggiunta, un ADC viene impiegato per convertire l'uscita analogica in un segnale digitale in modo tale da ridurre la tensione e il rumore. Il segnale digitale è poi mandato al blocco di gestione ed elaborazione dei dati, e quindi pubblicato sul display.

| Property | Value |
|--|-------------------|
| Resolution ³ in the first phase | 60 <i>nN</i> |
| Measurement range in the first phase | 165 μN |
| Resolution in the second phase | 0.4 μN |
| Measurement range in the second phase | ± 2 <i>mN</i> |
| First resonant frequency (lowest) | 3450 <i>Hz</i> |

Tabella 3.1 Tabella delle specifiche previste per il dispositivo.

Dalla tabella 3.1 si nota il principale vantaggio di questo tipo di sensore, ovvero la possibilità di misurare forze su un ampio intervallo, da nano-Newton a milli-Newton. Inoltre presenta una sensibilità maggiore rispetto ad altri sensori di forza esistenti senza tuttavia compromettere la rigidità della flessione, favorendo un processo di fabbricazione flessibile. Possiede, inoltre, due stadi di risoluzione per la forza, che fornisce un grande potenziale in settori come la biomeccanica e la microrobotica.

³ Risoluzione: è la più piccola variazione del segnale di ingresso che un dispositivo o un sistema è in grado di rilevare in modo affidabile.

CAPITOLO 4

RF MEMS

1. Definizione

Il termine *radio frequency (RF) microelectromechanical system (MEMS)* si riferisce a dispositivi con parti di dimensioni sub-millimetriche (travi, pettini, dischi o anelli), in movimento, che forniscono una funzionalità RF.

In questo elaborato si è concentrati sui dispositivi RF MEMS elettrostatici, come gli interruttori RF MEMS e i risonatori RF MEMS. [10]

2. RF MEMS switch

L'interruttore RF MEMS gioca un ruolo chiave nei ricetrasmittitori multibanda/multicanale. Esso presenta due configurazioni fisiche principali: trave incastrata (cantilever), oppure ponte a doppio ancoraggio (asta fissata alle sue estremità); e possono essere classificati secondo i seguenti parametri metodo di attuazione (elettrostatico, elettrotermico, magnetostatico o piezoelettrico), flessione dell'asse (verticale o laterale), dalla configurazione del circuito (serie o *shunt*), sospensione (trave incastrata oppure ponte a doppio ancoraggio) e per ultima l'interfaccia di contatto (capacitiva o ohmica).

2.1. RF MEMS switch elettrostatico

Si analizzano di seguito un interruttore RF MEMS attuato elettrostaticamente. Esso offre bassa perdita di inserzione¹ ed elevato isolamento, linearità, gestione della potenza e fattore elettrico Q_c .

¹ Perdita d'inserzione: è la perdita di potenza di un segnale dovuta all'inserimento di un dispositivo all'interno di una linea di trasmissione o in una fibra ottica ed è espressa di decibel. [g]

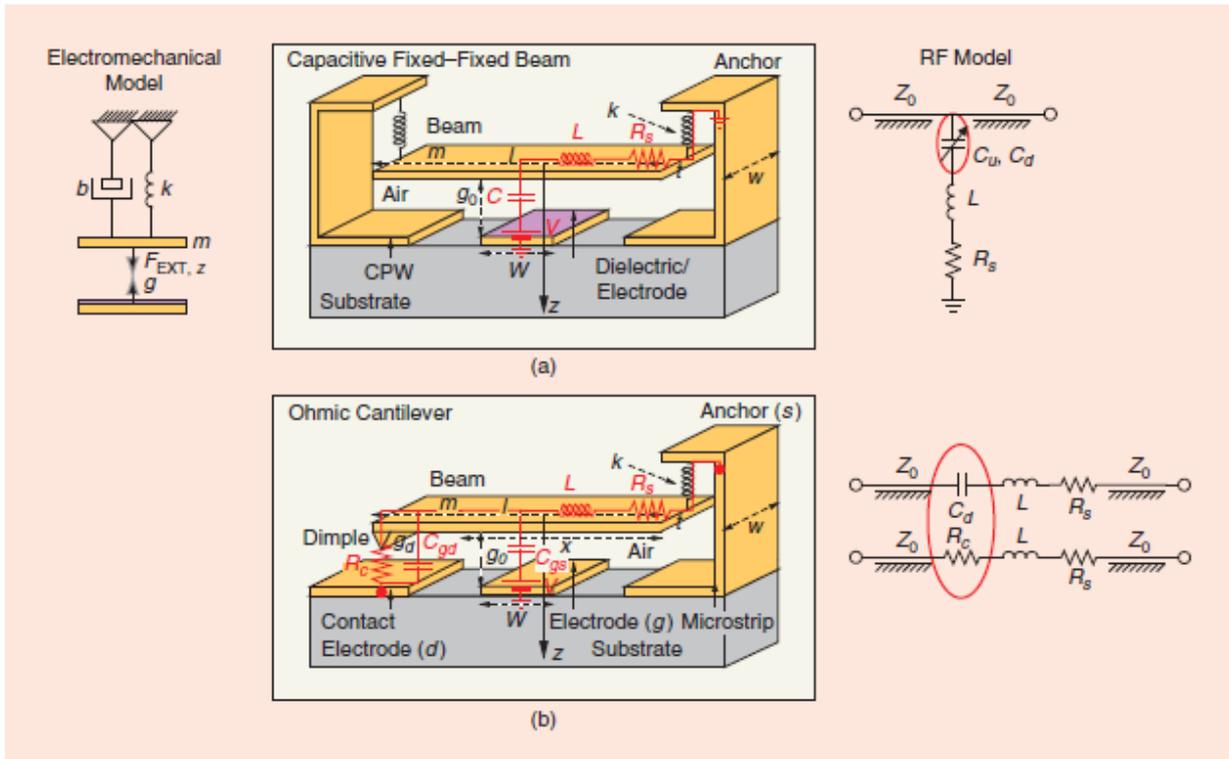


Figura 4.1 a) Modello elettromeccanico e RF di un RF MEMS capacitivo b) Modello elettromeccanico e RF di un RF MEMS resistivo

2.1.1. RF MEMS switch capacitivo

Un interruttore RF MEMS capacitivo (figura 4.1 a) basato sulla configurazione ponte a doppio ancoraggio, consiste in un condensatore, lavorato a livello microscopico, che possiede un elettrodo (asta), che si può muovere superiormente. L'asta, che talvolta è perforata allo scopo di ridurre lo smorzamento dovuto allo schiacciamento del gas interposto tra il ponte MEMS e l'elettrodo di attuazione, è sospesa tramite delle molle sopra un elettrodo inferiore, separati da uno strato d'aria g_0 e un dielettrico con spessore t_d , per impedire un contatto diretto fra le due strutture. Generalmente è connesso in *shunt*² con la linea di trasmissione, cioè posizionato in parallelo tra la linea di trasmissione e la massa del circuito, ed è usato per frequenze da 8 – 110 Hz, offrendo basse perdite di inserzione se non attuato e un alto isolamento se polarizzato. Il funzionamento è concettualmente semplice: tra l'asta MEMS e massa (dispositivo shunt) vi è la capacità, che al passaggio del segnale RF risente della forza di attrazione elettrostatica e tende ad avvicinare le due strutture realizzando così una variazione di capacità significativa. Alle alte frequenze tale variazione viene vista approssimativamente come un cortocircuito, lasciando passare il segnale sulla linea, mentre se attuato il segnale RF viene deviato verso massa annullando la tensione sulla linea.

² Shunt: è una resistenza elettrica, che devia attraverso di sé una parte più o meno consistente della corrente circolante in un circuito principale a cui è posizionato in parallelo.

2.1.2.RF MEMS switch ohmico

Un interruttore RF MEMS ohmico (figura 4.1 b), invece, con una configurazione a trave incastrata presenta comportamento capacitivo se non viene applicata nessuna tensione di polarizzazione (*up-state position*). Offre una bassa impedenza al passaggio del segnale RF, abbassandosi e realizzando un contatto ohmico fra le estremità della linea di trasmissione (serie), oppure fra la linea di trasmissione e la massa (shunt), (*down-state position*). E' un dispositivo asimmetrico con il morsetto disegnato come *source* e l'elettrodo di contatto disegnato come *drain*, analogamente ai FET (field effect transistor). Generalmente è connesso in serie con la linea di trasmissione ed è usato per frequenze da 0 – 40 GHz .

3.Sistema massa-molla-smorzatore

Dal punto di vista elettromeccanico, i dispositivi si comportano come un sistema massa-molla-smorzatore attuato da un forza elettrostatica $F_e(z, V)$ in *up- state position* e attuata da $F_e(z, V)$ più una forza di contatto $F_c(z)$ in *down- state position*. Il movimento del sistema massa-molla-smorzatore sarà limitato alla componente assiale z . La legge di Newton per lo spostamento di masse libere può essere scritta nella seguente maniera

$$ma + bv + k_1z + k_3z^3 = F_e(z, V) + F_c(z) \quad (1)$$

dove a è l'accelerazione e v la velocità della massa, entrambe lungo l'asse z .

Il vantaggio principale di un modello a un grado di libertà è la semplicità, però a questa si vanno ad aggiungere la minor accuratezza e l'impossibilità di modellare stati con una deformazione asimmetrica dell'asta come uno stato di rilascio parziale. In questo stato di rilascio parziale, l'interruttore fa contatto su un'area limitata. Le dimensioni e la forma di quest'area dipende non solo dalla tensione continua di polarizzazione V_s , ma anche dallo stato precedente. Lo smorzatore b , la massa m e la molla k_1 condividono lo stesso spostamento z . Inoltre, questi tre elementi sono connessi in serie, se consideriamo l'analogia tra il dominio dell'energia cinetica e quella elettrica (Tabella 1).

TABLE 1. Analogies between energy domains (disciplines).

| Nature | Acoustic Domain | | Electrical Domain | | Mechanical Domain | | Thermal Domain | |
|--------------------------|---------------------|--------|-------------------|--------|-----------------------|--------|---------------------|-----------|
| | Parameter | Symbol | Parameter | Symbol | Parameter | Symbol | Parameter | Symbol |
| Potential | Pressure | p | Voltage | V | Force | F | Temperature | T |
| Flow | Volume velocity | U_v | Current | i | Velocity | v | Entropy flow rate | \dot{S} |
| Generalized displacement | Volume displacement | U | Charge | q | Displacement | z | Entropy | S |
| Generalized resistance | Acoustic resistance | R_A | Resistance | R | Damping | b | Thermal resistance | R_T |
| Generalized inductance | Inertance | L_A | Inductance | L | Mass | m | — | — |
| Generalized capacitance | Acoustic compliance | C_A | Capacitance | C | Mechanical compliance | $1/k$ | Thermal capacitance | C_T |

Tabella 4.1 Analogia tra domini energetici

3.1.Circuito serie RLC

Il circuito elettrico equivalente al sistema massa-molla-smorzatore, ossia il circuito serie RLC presenta una frequenza fondamentale di risonanza meccanica ω_m

$$\omega_m = \sqrt{\frac{k_1}{m}} \quad (2)$$

e un fattore meccanico Q_m

$$Q_m = \frac{k_1}{\omega_m b} = \frac{\omega_m m}{b}. \quad (3)$$

Lo spostamento effettivo della massa dell'asta è dato da

$$m = 0.396 \rho l w t \quad (4)$$

ove ρ è la densità della massa del materiale dell'asta, l, w e t sono le dimensioni dell'asta. Siccome l'asta è ancorata a un'estremità oppure a entrambe le estremità, la massa dell'asta viene ridotta del 60%. Il coefficiente correttivo 0.396 della massa effettiva rispetto a quella nominale è valido solo per aste che si flettono oppure per aste vibranti secondo modalità flessionale.

La costante della molla del ponte, indicante la sua rigidezza, è data da

$$k_1 = 32 E w \left(\frac{t}{l}\right)^3 \left(\frac{27}{49}\right) + 8 \sigma (1 - \nu) w \frac{t}{l} \left(\frac{3}{5}\right), \quad (5)$$

mentre per la trave abbiamo

$$k_1 = 2Ew \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{1 - \frac{x}{l}}{3 - 4\left(\frac{x}{l}\right)^3 + \left(\frac{x}{l}\right)^4} \quad (6)$$

dove E è il modulo di Young, σ la tensione residua, e ν è il coefficiente di Poisson relativo al materiale dell'asta. Il modulo di Young e il coefficiente di Poisson descrivono le proprietà elastiche di un materiale isotropico.

Un'approssimazione di primo ordine per il fattore di merito meccanico Q_m nel caso ponte a doppio ancoraggio è data da

$$Q_m = \frac{\sqrt{E\rho} t^2}{\mu \left(\frac{wl}{2}\right)^2} g_0^3, \quad (7)$$

e per quanto riguarda la trave

$$Q_m = \frac{\sqrt{E\rho} t^2}{\mu (wl)^2} g_0^3. \quad (8)$$

Un interruttore RF MEMS ben fatto presenta una $Q_m = 1$, che risulta nel minor tempo di sedimentazione. Una volta che il condensatore RF MEMS è stato caricato con la tensione di pilotaggio, una forza elettrostatica, $F_e(g, V)$, è esercitata sull'asta. $F_e(g, V)$, è il gradiente del potenziale coenergia immagazzinata nel trasduttore capacitivo, ed è così definito

$$F_e(g, V) = \frac{1}{2} \frac{\partial (CV^2(t))}{\partial g} g = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 AV^2(t)}{g^2} g, \quad (9)$$

dove A è l'area dell'elettrodo, g è la distanza tra l'asta e l'elettrodo, e $V(t)$ è la tensione lungo il condensatore RF MEMS. La tensione di pilotaggio V può essere scritta come somma della tensione continua di polarizzazione V_s e della tensione RF $v_{in}(t) = v_{in} \sin(\omega t)$, come segue

$$F_e(z, V) = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A (V_s + v_{in}(t))^2}{g^2(z)} z. \quad (10)$$

La conoscenza di k_1 e m permette il calcolo della tensione di *pull-in* V_p , che è la tensione continua di polarizzazione necessaria per spingere l'asta, la tensione di fermata V_H , che è la tensione continua di polarizzazione necessaria per mantenere ferma l'asta e il tempo di interruzione t_s . La forza elettrostatica di rinforzo risulta essere:

- in un punto di equilibrio instabile se la derivata della forza netta sull'asta rispetto allo spostamento z è positivo;
- in un punto di equilibrio stabile critico se la derivata è nulla, cioè per $z = g_0/3$.

V_P e V_H di un interruttore RF MEMS capacitivo con configurazione ad asta ancorata è data da

$$V_P = \sqrt{\frac{8k_1(g_0 + (t_d/\epsilon_d))^2}{27\epsilon_0 A}} \quad (11)$$

$$V_H = \sqrt{\frac{2k_1 g_0 (t_d/\epsilon_d)^2}{\epsilon_d \epsilon_0 A}} \quad (12)$$

dove g_0 è la distanza tra l'asta e il dielettrico o l'elettrodo nello stato alto, t_d è lo spessore del dielettrico, e ϵ_d è la costante dielettrica del dielettrico.

Invece per un interruttore RF MEMS ohmico con configurazione a trave incastrata abbiamo

$$V_P = \sqrt{\frac{8k_1 g_0^3}{27\epsilon_0 A}} \quad (13)$$

$$V_H = \sqrt{\frac{2k_1 (g_0 - g_d)(g_d)^2}{\epsilon_0 A}} \quad (14)$$

dove g_d è lo spessore della cavità.

3.2. Modello RF

Da una prospettiva RF, entrambi i dispositivi si comportano come un condensatore non lineare tempo variante in serie con una resistenza parassita RF, R_s , e un'induttanza L . Il condensatore può essere linearizzato intorno allo stato alto e basso del condensatore RF MEMS. La capacità relativa allo stato alto, C_u ($|V_s| < |V_P|$), è data da

$$C_u = \frac{\epsilon_0 A}{g_0 + (t_d/\epsilon_d)}. \quad (15)$$

La capacità relativa allo stato basso, C_d ($|V_s| < |V_H|$), è data da

$$C_d = \frac{\epsilon_d \epsilon_0 A}{t_d}. \quad (16)$$

Il rapporto alto tra le due capacità $C_r = C_d/C_u$ è un prerequisito per un elevato isolamento tra lo stato OFF e ON del switch.

Le figure di merito dell'interruttore unipolare a inserzione singola, sia esso RF MEMS o basato sui semiconduttori include:

- *Larghezza di banda, perdita d'inserzione e isolamento.* Un basso prodotto $R_{ON}C_{OFF}$ o un elevato rapporto di capacità C_{ON}/C_{OFF} garantiscono un'ampia larghezza di banda, una bassa perdita d'inserzione e un elevato isolamento. R_{ON} è la resistenza del

contatto ohmico dell'interruttore unipolare a inserzione singola, mentre C_{ON} e C_{OFF} le capacità. Gli interruttori unipolari a singola inserzione RF MEMS sono ampi in banda grazie alla polarizzazione elettrostatica e all'assenza di RF parassite, e presentano bassa perdita d'inserzione e alto isolamento.

- *Consumo di potenza.* A riposo, i dispositivi RF MEMS attuati elettrostaticamente non presentano consumo di potenza. Mentre durante la commutazione siamo in presenza di consumo di potenza dovuto alla dissipazione di energia elettrica (perdita ohmica dovuta al transitorio della corrente e alla carica del condensatore) e dissipazione di energia meccanica (smorzamento del movimento). Inoltre, l'isteresi elettrostatica comporta ulteriore dissipazione di energia elettrica e meccanica .
- *Gestione della potenza.* La manipolazione della potenza di rottura è determinata dal massimo valore quadratico medio possibile della densità di corrente RF attraverso l'asta, J_{RMS} , alla luce dell'elettromigrazione, e dalla massima V_{RMS} possibile alla luce della rottura del dielettrico. L'elettromigrazione è il trasporto di massa causato da un'elevata densità di corrente diretta, la quale strappa ioni dal reticolo conduttore. Sfortunatamente rispetto alla fermata ($V_{RMS} > V_H$ nello stato basso) e all'autoattuazione ($V_{RMS} > V_P$ nello stato alto), l'elettromigrazione e la rottura del dielettrico sono irreversibili. J_{RMS} e V_{RMS} sono relazionate tramite l'impedenza caratteristica della linea di trasmissione $Z = V_{RMS}/J_{RMS}$. La gestione della potenza nei interruttori freddi è limitata dall'elettromigrazione e dall'autoattuazione, mentre quelli caldi sono limitati dalla fermata (*hold-down*) per gli interruttori RF MEMS capacitivi ad asta ancorata alle estremità, e dalla degradazione del contatto resistivo per quanto riguarda gli interruttori RF MEMS ohmici a trave incastrata. La commutazione fredda è definita tale in assenza di potenza RF, mentre quella calda è definita tale in presenza di potenza RF. Gli interruttori RF MEMS capacitivi hanno una manipolazione della potenza maggiore rispetto a quelli ohmici.
- *Affidabilità.* I potenziali fattori che possono ridurre l'affidabilità e la vita del dispositivo sono la carica dielettrica, la stizione indotta dall'umidità, la degradazione dei contatti, e le cricche. Per cricca si intende la tendenza dei materiali, come metalli e polimeri, di deformarsi quando soggetti a un carico costante.
- *Tempo di commutazione.* Se i dispositivi RF MEMS sono limitati dalla smorzatura ($Q_m < 2$), allora il tempo di commutazione t_s può essere approssimato a t_{smax}

$$t_{smax} \approx \frac{27V_P^2}{4\omega_m Q_m V_S^2}. \quad (17)$$

Se il dispositivo RF MEMS è limitato dall'accelerazione ($Q_m > 2$), allora t_s può essere approssimato a t_{smin}

$$t_{smin} \approx 3.67 \frac{V_P}{V_S \sqrt{k_1/m}} \sim \sqrt{\frac{\rho}{E}} \text{ nel caso } V_S = V_P \quad (18)$$

Gli interruttori RF MEMS SPST ohmici a trave incastrata sono commerciabili. Invece, gli interruttori RF MEMS SPST capacitivi a ponte non sono commerciabili perché la frequenza RF necessaria per poter trascurare la capacità C_{ON} deve essere alta (10 – 40 GHz). Esiste una soluzione ibrida basata su un PCB e un dispositivo discreto impraticabile per ovviare a questo problema. Tuttavia, la tecnologia di fabbricazione MEMS e quella dei circuiti integrati stanno lavorando verso l'integrazione eterogenea di processi RF MEMS e (Bi)CMOS allo scopo di poter integrare più dispositivi possibili su un chip e aumentare la selettività delle sintonizzazioni.

4. Risonatori RF MEMS oscillanti

I risonatori RF MEMS oscillanti (vibranti) presentano un'asta oscillante, pettine, disco, o anello, sufficientemente isolato dall'ambiente circostante da ottenere un alto fattore di merito meccanico Q_m . I risonatori RF MEMS oscillanti basati su aste sono classificati per:

- *meccanismo di attuazione (elettrostatico, piezoelettrico, termico)*. Il materiale nella trasduzione elettrostatica può essere scelto in modo tale da essere acusticamente contrapposti, allo scopo di prevenire le radiazioni acustiche³ dell'energia meccanica indotta dalle oscillazioni. I sottili film piezoelettrici con marcato comportamento ferroelettrico, come il $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ (PZT piombo zirconato di titanio), sono ottimali per accurate sintonizzazioni, però presentano un'isteresi ampiezza-frequenza marcata, la quale limita E_{max} , che è la capacità di immagazzinamento dell'energia (somma dell'energia cinetica e potenziale) nella media dei tempi.
- *ancoraggio (fisso-fisso, libero-libero, stelo)*. I risonatori in configurazione ponte a doppio ancoraggio hanno grandi perdite di ancoraggio dovute alla non funzionalità del moto ancorante, all'oscillazione indotta dalle radiazioni acustiche e presentano un Q_m minore rispetto ai risonatori in configurazione asta libera.
- *geometria dell'oscillazione (asta, pettine, disco, anello)*. E_{max} e Q_m non possono essere ottimizzati in maniera indipendente l'uno dall'altro nei risonatori RF MEMS oscillanti in configurazione asta, disco o anello, quindi si deve arrivare a dei

³ Radiazioni acustiche: è il risultato della conversione di una vibrazione di una struttura eccitata in una compressione pulsante dell'aria circostante. [h]

compromessi. I risonatori RF MEMS oscillanti basati sull'asta presentano una E_{max} elevata. I pettini permettono una attuazione elettrostatica lineare (perché la capacità RF MEMS varia linearmente con lo spostamento), ma sono grandi e sono indirizzate verso applicazioni a bassa frequenza.

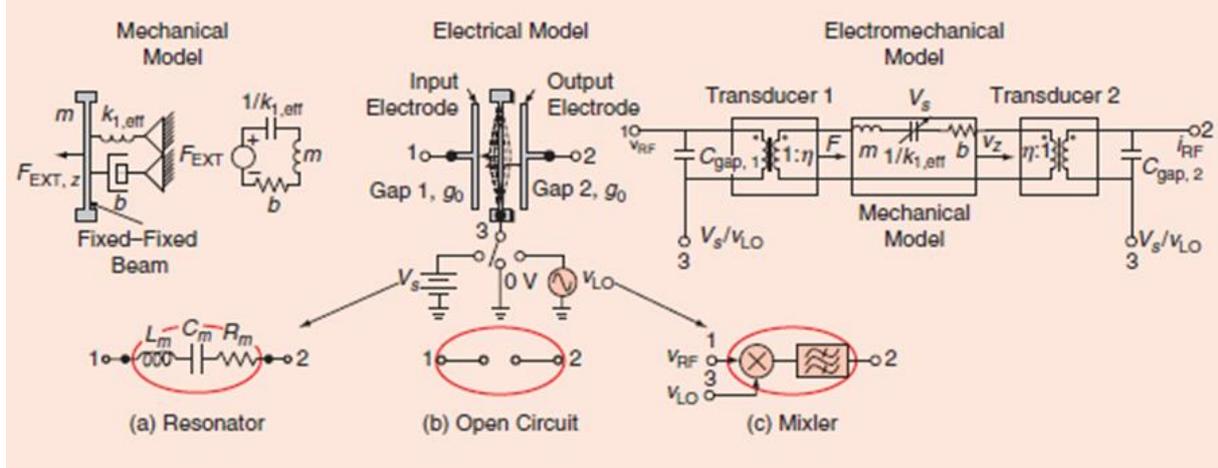


Figura 4.2 Modello elettromeccanico e modello RF di un risonatore RF MEMS oscillante ancorato alle due estremità.

4.1. Modello elettromeccanico

La modalità di flessione di un risonatore RF MEMS a ponte a doppio ancoraggio (figura 4.2), consiste in due condensatori RF MEMS, che condividono l'asta. Le due capacità RF MEMS sono connesse in serie in modo tale da abbassare la capacità statica tra il nodo d'ingresso (nodo 1) e il nodo d'uscita (nodo 2). E' eccitato da una forza elettrostatica non lineare tempo variante $F_e(z, V)$,

$$F_e(z, V) = \frac{1}{2} \frac{C_0 g_0}{(g_0 - z)^2} V_1^2(t) z - \frac{1}{2} \frac{C_0 g_0}{(g_0 + z)^2} V_2^2(t) z \quad (19)$$

dove $V_1(t) = V_s + v_{in}(t) = V_s + v_{in} \sin(\omega t)$ e $V_2 = V_s$.

Basandoci sull'espressione (19) e (21), la seconda legge di Newton può essere linearizzata e riscritta nella forma:

$$m a(t) + b v(t) + k_{1_{eff}} z(t) = \eta v_{in}(t) \quad (20)$$

dove $k_{1_{eff}}$ è la costante effettiva della molla, che è determinata da:

$$k_{1_{eff}} = k_1 - \frac{2\eta^2}{C_0} \quad (21)$$

e η è il coefficiente elettromeccanico di accoppiamento, che è definito dall'espressione:

$$\eta \approx V_s \frac{C_0}{g_0} \quad (22)$$

Il modello circuitale equivalente di un risonatore RF MEMS operante in regime lineare (figura 4.2) consiste in:

- un trasduttore in ingresso, che converte una tensione d'ingresso, $v_{in}(t)$, in una forza elettrostatica $f_e(t) = \eta v_{in}(t)$. Può essere modellato usando un trasformatore con un rapporto spire $1:\eta$. Il trasduttore attuato elettrostaticamente può essere spento rimuovendo semplicemente la tensione continua di polarizzazione, V_s .
- il risonatore meccanico è un sistema massa-molla-smorzatore, pilotato da $f_e(t)$. Può essere modellato usando un circuito equivalente serie RLC, che consiste in una resistenza, $R = b$, un'induttanza, $L = m$, e una capacità $C = 1/k_{1eff}$. L'oscillazione forzata richiede che la forza elettrostatica, $f_e(t)$, oscilli armonicamente con frequenza, f_m .
- un trasduttore in uscita, che converte la velocità della trave in una corrente d'uscita, $i_{out}(t) \approx -\eta v(t)$. Può essere modellato con un trasformatore con un rapporto di spire $\eta:1$.

Il circuito equivalente è costituito da due trasformatori, rappresentanti l'accoppiamento elettromeccanico, e il circuito serie RLC, rappresentante il sistema massa-molla-smorzatore. Questo può essere semplificato a un singolo circuito RLC serie, a cui ci riferiamo d'ora in poi con il termine *ramo cinetico* (motional branch). Il ramo cinetico è un circuito serie RLC, che consiste in una resistenza cinetica R_m , un induttanza cinetica L_m , e una capacità cinetica C_m , e che presenta una frequenza naturale di oscillazione elettrica ω_e e un fattore di merito elettrico Q_e :

$$R_m = \frac{\sqrt{k_{1eff}m}}{Q_m\eta^2} \quad (23)$$

$$L_m = \frac{m}{\eta^2} \quad (24)$$

$$C_m = \frac{\eta^2}{k_{1eff}} \quad (25)$$

$$\omega_e = \omega_m = \frac{k_{1eff}}{m} \quad (26)$$

$$Q_e = Q_m = \frac{k_{1eff}}{\omega_m b} = \frac{\omega_m m}{b} \quad (27)$$

Nei risonatori RF MEMS oscillanti attuati elettrostaticamente, sia un piccolo gap g_0 sia una tensione continua di polarizzazione alta V_s , è necessaria per ottenere una piccola resistenza cinetica R_m e una grande Q_m . Un piccolo gap g_0 aumenterà la capacità del ramo statico, che

consiste nella capacità del trasduttore $C_{gap_1}(z, V) \approx C_0$, $C_{gap_2}(z, V) \approx C_0$, e C_{thru} , in tal modo abbassiamo il fattore di accoppiamento $k_{eff}^2 = C_m/C_{thru}$ e cortocircuitiamo il ramo cinetico. In aggiunta, ogni condensatore o resistenza parassita RF al substrato abbasserebbe ulteriormente Q_m . Grazie all'alta resistenza R_m dell'ordine di megaohm, il risonatore RF MEMS è usato come convertitore tensione- corrente ($v - i$)

$$\frac{I_{OUT}(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{1}{R_m} \frac{\left(\frac{\omega_m}{Q_m}\right)s}{s^2 + \left(\frac{\omega_m}{Q_m}\right)s + \omega_m^2}. \quad (28)$$

I vantaggi di questa tecnologia rispetto ai oscillatori a cristalli di quarzo è la possibilità di essere integrata nei CMOS, presenta un alta resistenza a urti e vibrazioni grazie alla loro massa ridotta. I principali svantaggi riguardano bassa frequenza di equilibrio a causa della variazione della tensione di polarizzazione continua, le tolleranze di fabbricazione e la deriva dovuta alla temperatura.

Capitolo 5

Biomems

Biomedical MEMS integrano sensori micrometrici, attuatori, microfluidica, micro-ottica, e elementi strutturali con le tecniche computazionali e di comunicazione allo scopo di sviluppare applicazioni mediche, che possano migliorare la salute dell'uomo. [12]

Le aree in cui i dispositivi BioMEMS si stanno affermando sono:

- microsistemi chirurgici (strumenti chirurgici intelligenti micro-invasivi);
- microsistemi diagnostici (biochips);
- microsistemi terapeutici (sistemi di gestione della salute).

In questo elaborato verranno spiegati brevemente tre esempi di dispositivi relativi alle aree sopracitate sviluppate dall'università di Minnesota.

1.1. Microsistemi chirurgici

L'università di Minnesota ha sviluppato un micromotore per applicazioni chirurgiche di precisione. Il motore è stato progettato per adattarsi alla mano. E' composta da un cilindro in acciaio inossidabile, e usa due wafer di silicio e un'asta piezoelettrica. Il suo funzionamento prevede l'uso di un morsetto elettrostatico formatosi nel dielettrico (ossido/nitrato) tra i due wafer di silicio per immobilizzare il micromotore, mentre l'attuatore piezoelettrico genera sia la forza sia lo spostamento. Lo spostamento è generato sfruttando le proprietà inerziali di una massa attaccata con espansioni/contrazioni veloci e lente del materiale piezoelettrico. La transizione veloce usa l'inerzia della massa per spostare il morsetto, mentre le transizioni lente muovano la massa tenendo fermo il morsetto. Applicando in modo giusto l'attuazione sequenziale a tre step ai due morsetti elettrostatici e al materiale elettrostatico, viene creato un movimento liscio.

1.2. Microsistemi diagnostici

I micro sensori biomolecolari di riconoscimento possono potenzialmente provvedere un metodo redditizio per diagnosticare rapidamente e a basso costo la salute. Questi dispositivi solitamente contengono superfici molecolari selettive sulle quali appropriate molecole coniugate selettivamente si fissano producendo una variazione misurabile in un determinato parametro fisico. E' stato sviluppato un rilevatore per variazioni risonanti della massa inerziale allo scopo di analizzare malattie comuni, identificare predisposizioni genetiche e sviluppare farmaci.

Consiste in un microcanale lavorato all'interno di una trave incastrata sospesa. La parte interna del microcanale è trattata per fissarsi alle sostanze biomolecolari di interesse. Un pilotaggio elettrostatico impone alla trave di oscillare nel vuoto alla sua frequenza di risonanza f_0 . A mano a mano che il materiale si accumula nel microcanale, la sua massa aumenta di Δm , quindi la frequenza di risonanza si abbassa, Δf , secondo la relazione

$$\frac{\Delta f}{f_0} = S_m \Delta m \quad (1)$$

dove S_m è una costante proporzionale dipendente dalle dimensioni della trave, effetti smorzanti ecc. Un'illustrazione schematica è rappresentata in figura 5.1.

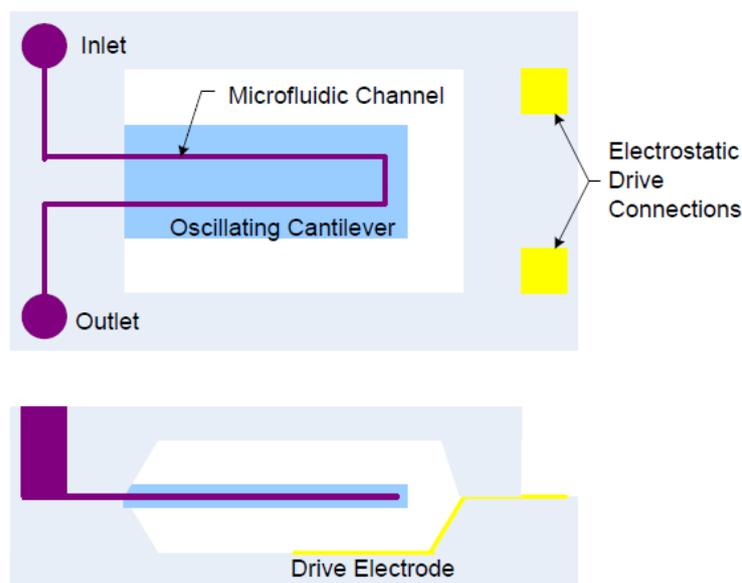


Figura 5.1 Microchannel resonant mass sensor

1.3. Microsistemi terapeutici

I sistemi terapeutici offrono la possibilità della gestione autonoma della salute e la consegna precisa delle medicine. Alcune tecnologie MEMS chiave impiegate in tale microsistema sono le micropompe, microvalvole e microcapillari.

BioMEMS rappresenta un campo eccitante e in continua evoluzione con l'opportunità di migliorare la condizione umana e abbassare i costi della sanità. I microsistemi chirurgici hanno il vantaggio di permettere una chirurgia intelligente e precisa con tempi brevi di recupero del paziente. I microsistemi diagnostici permetteranno l'immagazzinamento e l'elaborazione di una quantità enorme di dati tra cui, l'assenza o la presenza di malattie, e l'identificazione dei biomarkers, che predicono lo sviluppo della malattia nel paziente. Invece, i microsistemi terapeutici come sistemi di gestione autonoma della terapia potranno potenzialmente permettere ai pazienti, che affrontano delle terapie complesse, ad avere una vita normale.

CAPITOLO 6

Applicazioni notevoli e conclusioni

1.Mercato dei dispositivi MEMS

I dispositivi MEMS sono usati nelle attività di tutte le aree industriali, sanità, prodotti di consumo, edilizia, hardware militari e spaziali. Questa offerta variegata di prodotti e la globalizzazione dell'industria è andata di pari passo a un aumento degli introiti e un aumento dell'investimento privato.

In figura 6.1, è illustrato un grafico basato sui dati raccolti dallo Yole Development, e pubblicate in un rapporto di J.Eloy. Si osserva che tale grafico rappresenta i redditi provenienti dai diversi dispositivi MEMS tra il 2002 e il 2005. [11]

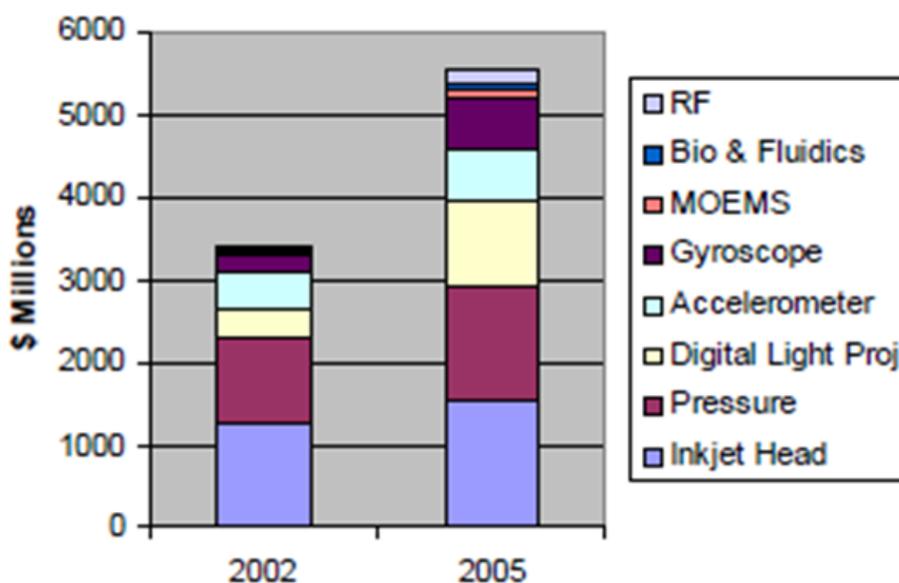


Figura 6.1 Redditi relativi ai prodotti MEMS pubblicato da Yole Development

E' possibile notare dal grafico che sono tre i principali prodotti, maggiormente presenti nell'industria MEMS, ossia le testine per le cartucce, proiettori digitali e dispositivi inerziali, come accelerometri e giroscopi. La domanda di questa tipologia di prodotti si aspetta resti alta, data il loro utilizzo nel ramo automotive e nell'elettronica di consumo.

2. Classi di dispositivi MEMS

A mano a mano che le applicazioni destinate al mercato sono sviluppate, aumenta anche la diversità dei dispositivi MEMS. Le più importanti classi di dispositivi, in termini del loro valore attuale e futuro sono elencate in tabella 6.1.

| Application | 2005 | 2015 |
|----------------------|-------------|-------------|
| Pressure Sensors | \$3.0B | \$6.0B |
| In-Vitro Diagnostic | \$0.01B | \$5.0B |
| Read/Write Heads | \$2.0B | \$4.0B |
| Ink Jet Print Heads | \$2.0B | \$3.5B |
| Optical Displays | \$1.0B | \$3.0B |
| Gyroscopes | \$0.1B | \$2.0B |
| Lab-on-a-chip | \$0.01B | \$2.0B |
| Drug Delivery System | \$0.0 | \$1.5B |
| Inertial Sensors | \$0.2B | \$1.5B |
| Chemical Sensors | \$0.1B | \$1.0B |
| Optical Switches | \$0.1B | \$1.0B |
| RF Devices | \$0.1B | \$1.0B |
| Microspectrometers | \$0.02B | \$0.4B |

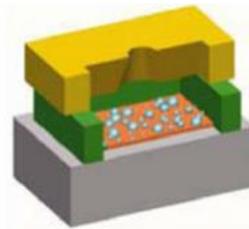
Tabella 6.1 Previsione crescita dispositivi MEMS

Tali applicazioni si possono suddividere in quattro classi di dispositivi, chiamate fluidica, ottica, elettrica e inerziale. Alcune applicazioni, come *lab-on-a-chip* e radio digitali, richiedono diversi pacchetti di componenti, che devono essere integrati in microscala per adempiere alle richieste di prestazioni. Il futuro dei MEMS, infatti si indirizza verso l'integrazione di un numero sempre maggiore di diversi componenti in un sistema di complessità notevole. La direzione presa è motivata sia dai benefici economici sia dalle nuove tendenze tecnologiche. Per esempio, l'efficienza dei motori a combustione, molti processi manifatturieri, la diagnosi medica, i sistemi robotici autonomi, e le comunicazioni subiranno dei miglioramenti grazie ai più avanzati sistemi MEMS. A conferma di tale sviluppo tecnologico ci sono i vari dispositivi presenti sul mercato, di cui in questo elaborato è offerto un breve elenco.

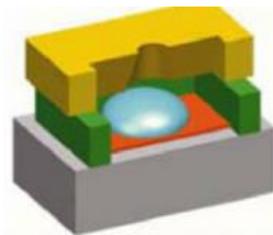
2.1. Dispositivi fluidici

2.1.1. Testine delle cartucce

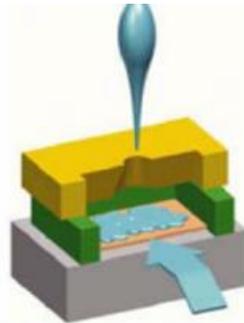
Rappresentano una tra le prime applicazioni della tecnologia MEMS, che ha avuto un aumento rapido diventando una tra le applicazioni più significanti economicamente grazie al loro uso nelle stampanti a basso costo. La loro progettazione non è cambiata tanto nel tempo. Si è ammodernata aumentando il numero degli ugelli nelle testine, mentre il campo tra di loro si è ridotto per migliorare la qualità della stampa. Le operazioni base sono rappresentate in figura 56.2.



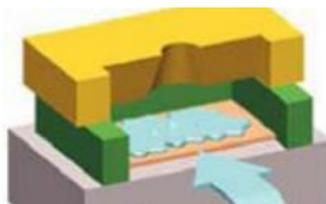
a) Nucleazione: camere riempite di inchiostro vengono riscaldate da sottili elementi resistivi



b) Crescita della bolla: riscaldando l'inchiostro una bolla è generata



c) Espulsione della goccia: la parte evaporata dell'inchiostro è spinta contro la carta sotto forma di minuscole goccioline



d) Riempimento: le camere sono riempite di nuovo d'inchiostro tramite dei microcanali

Figura 6.2 Operazioni base di un ugello della cartuccia

2.1.2. Il calibro di Pirani

Usa un filo riscaldato, con alto coefficiente di resistenza alla temperatura, per misurare la pressione inferiore a 10^{-5} torr. Il filo forma una parte del circuito a ponte di Wheatstone. Le molecole di gas collidono con l'elemento di misura del filo, che trasferisce il calore lontano da lui. La potenza necessaria per mantenere il filo a una temperatura costante e quindi la resistenza, è proporzionale alla pressione del gas. Le sue piccole dimensioni eliminano il trasferimento di calore per convezione, che limita l'accuratezza dei dispositivi più grandi. Una rappresentazione schematica del dispositivo è osservabile in figura 6.3.

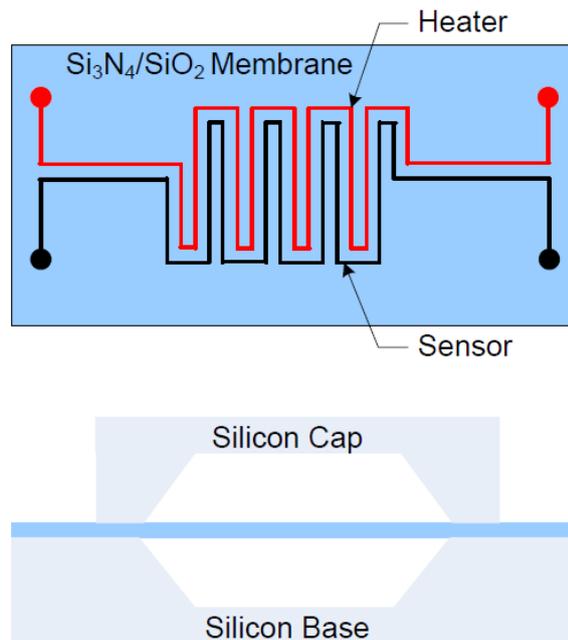


Figura 6.3 MEMS Pirani vacuum gauge

2.1.3. Sensore di flusso

È prodotto impilando cinque strati di ceramica trattate a basse temperature (figura 6.4). Il cuore del sensore consiste in un elemento riscaldante situato tra due resistenze misuranti la temperatura sullo strato tre della pila. I strati 2, 4, e 5 creano una conduttura che veicola il fluido dallo strato 1, attraverso gli elementi resistori per mezzo dello strato 2. Una potenza costante è dissipata sull'elemento riscaldante. La differenza tra la temperatura dei due resistori è proporzionale al tasso di flusso del fluido.

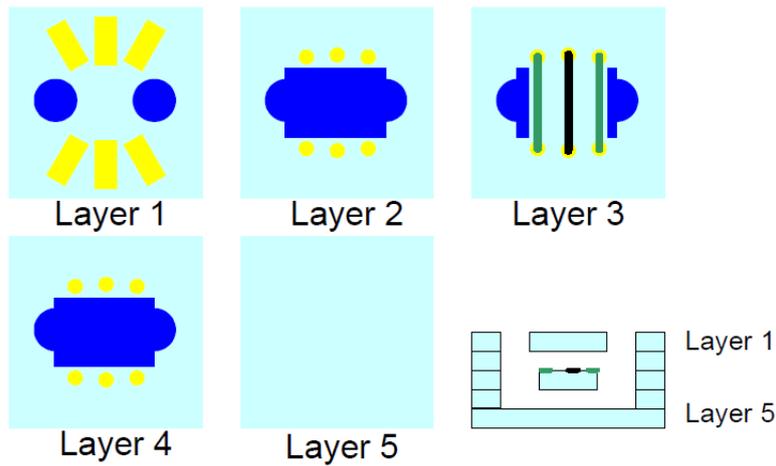


Figura 6.4 Sensore di flusso

2.2. Dispositivi ottici

2.2.1. Proiettore di luce digitale

Sviluppato e prodotto dalla Texas Instruments resta tutt'oggi uno tra le tecnologie più innovative e economicamente importante dei dispositivi MEMS. Un ampio array di specchi di alluminio mobili è fabbricato sullo strato superiore di un chip memoria CMOS. Gli elettrodi dietro ogni elemento specchio permettono di azionare tra due posizioni, in risposta ai contenuti della cella di memoria associata. Il dispositivo è il componente abilitante la luminosità, la proiezione in alta risoluzione sui display delle televisioni in alta definizione.

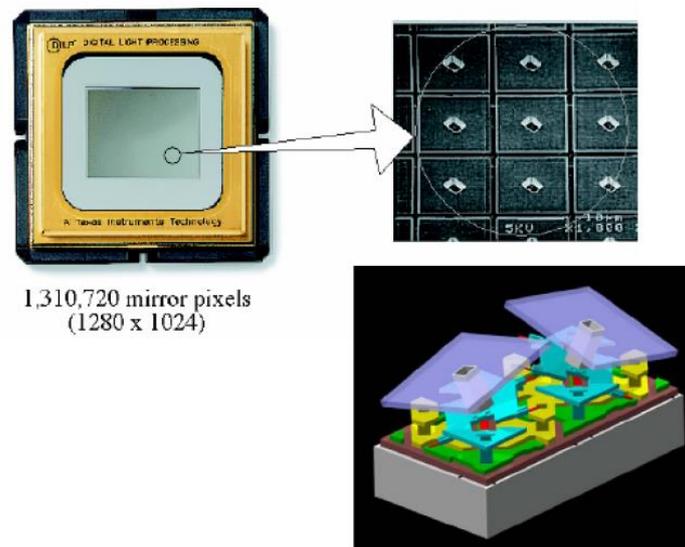


Figura 6.5 Costruzione di un proiettore di luce digitale della TI

2.2.2. Lenti liquide a focalizzazione variabile

Consiste in un fluido elettricamente conduttivo, che serve da elemento della lente, sigillato all'interno di un cilindro di vetro. Un elettrodo viene a contatto con il fluido, mentre un secondo, elettrodo isolato, è avvolto intorno alla parete interna del cilindro. La parete interna del cilindro è ricoperta con un rivestimento idrofobico per evitare che il liquido conduttivo la bagni. Un fluido non conduttivo riempie il volume interno del cilindro, che non è occupato dal liquido conduttivo. Il funzionamento della lente è illustrato in figura 6.6. Si nota che nello stato spento, rappresentato nella parte sinistra della figura 6.6, il fluido conduttivo presenta una curvatura positiva. Quando viene applicata una tensione tra i due elettrodi, la tensione superficiale del fluido conduttivo è ridotta lungo la parete del cilindro. Ciò implica che bagni più superficie possibile della parete e cambi curvatura.

È lo stesso meccanismo che si osserva nell'occhio umano, quando i piccoli muscoli di cui è provvisto tirano il cristallino, modificando così la rifrazione. Una videocamera provvista di questo tipo di lente è in grado di mettere a fuoco senza l'ausilio di alcun motore e senza dover muovere l'obiettivo manualmente, come ad esempio è necessario fare con una macchina fotografica classica. La messa a fuoco è estremamente precisa, rapida, stabile ed evita qualsiasi tipo di stress meccanico.

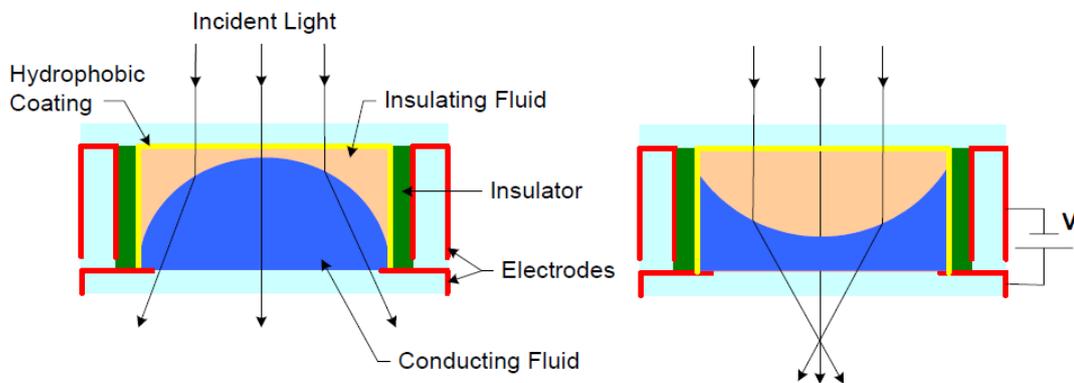


Figura 6.6 Funzionamento lente liquida a focalizzazione variabile.

2.2.3. Specchio adattivo

Rappresentato in figura 6.7, è costituito da due parti microlavorate in silicio. La parte superiore del chip è un contenitore per un film di alluminio metallizzato. La parte inferiore contiene un array di elettrodi, che deformano il film proporzionalmente alla quantità di cariche posizionate su di loro.

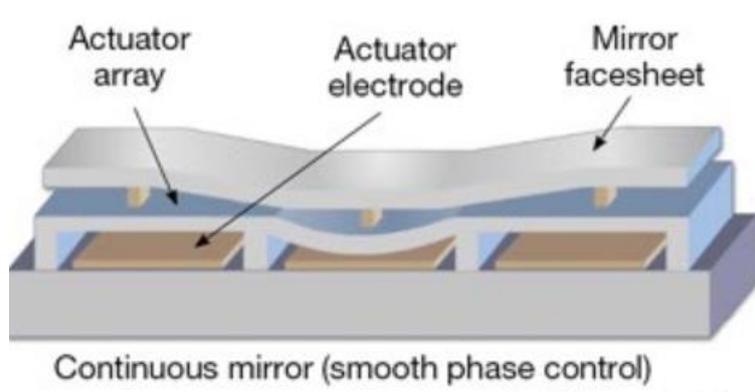


Figura 6.7 Schema di uno specchio adattivo

2.3. Dispositivi RF

2.3.1. Sonde neurali

Le sonde neurali costituite da micro- array di aghi elettricamente conduttivi, ognuno dei quali è comandato individualmente, hanno portato considerevoli promesse nel campo medico. Dispositivi impiantati in pazienti con disfunzioni motorie, hanno permesso loro di generare comandi per un sistema computerizzato. Impianti in persone non vedenti, hanno permesso loro di percepire immagini di forme geometriche semplici.

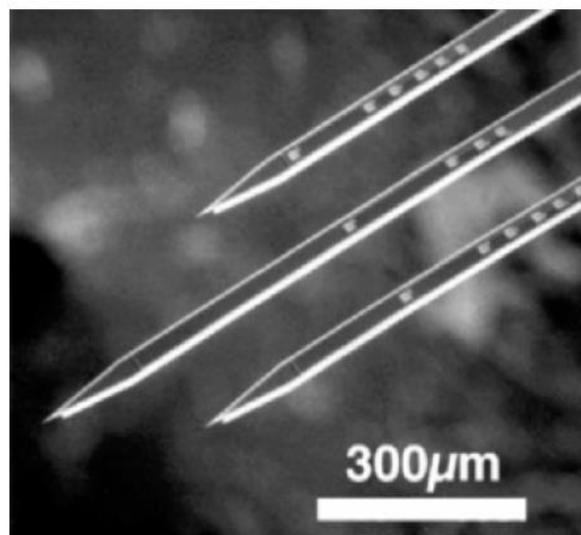


Figura 6.8 Sonde neurali

2.3.2. Dispositivi di immagazzinamento dati

Fabbricati usando enormi array di sonde *read/write* avrebbero capacità commensurate come quelle dei più capienti *hard drives* usati oggi. Il loro fattore di forma, tuttavia, si avvicina ai dispositivi a un singolo *chip* di memoria. Come i *hard drives*, sono un ambiente di immagazzinamento non volatile¹, ma meccanicamente robusto come una memoria a stato solido.

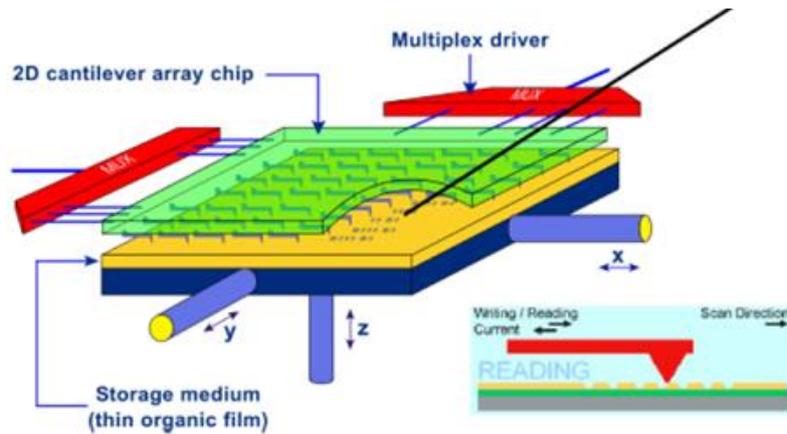


Figura 6.9 Schema di un array di sonde *read/write*

2.4. Dispositivi inerziali

Esempi lo sono gli accelerometri e i giroscopi, già affrontati precedentemente.

¹ Non volatile: è una tipologia di memoria informatica in grado di mantenere le informazioni anche quando non viene alimentata.

CONCLUSIONI

La varietà dei dispositivi MEMS è ampia e in continuo aumento. Inoltre, un numero sempre crescente di dispositivi MEMS vengono incorporati in sistemi funzionali. La diversità, i costi, e la compatibilità con le tecnologie di fabbricazione dei circuiti integrati hanno determinato la loro dominante presenza sul mercato.

Come è stato possibile osservare durante tutto l'elaborato i dispositivi MEMS includono sia parti elettroniche sia meccaniche, tuttavia la maggior parte dei test di collaudo sono elettronici.

Una delle grandi difficoltà legate a questa tecnologia è rappresentata dal collaudo meccanico. Il test è ormai indispensabile visto la spinta della ricerca nell'utilizzo di nuovi materiali come polimeri, ceramico e nuovi nanomateriali intelligenti per sostituire l'ormai consolidato silicio. La necessità è legata a un fatto tecnico, ossia la non conoscenza dettagliata del comportamento e le caratteristiche di tali materiali a livello micro. [i]

Un altro problema è legato all'ispezione dell'integrità del dispositivo. Molti problemi di microfabbricazione possono essere individuati grazie all'utilizzo di un microscopio ottico, però è nostro interesse individuare anche i problemi non osservabili come:

- inadeguatezza della sottigliezza dei strati costituenti il dispositivo MEMS;
- noncuranza del profilo laterale;
- problemi di adesione dei strati;
- tensione interna e gradienti di tensione;
- cricche;
- stiction;
- caratteristiche inadeguate dei materiali. [j]

Nonostante le difficoltà di collaudo e ispezione, negli ultimi due decenni sono stati fatti enormi avanzamenti in questo campo passando dalla semplice integrazione di microsensori e microattuatori su un unico substrato (PCB), ai sistemi intelligenti come i smartphone e per il futuro è prevista la capacità di creare dei sistemi intelligenti autosufficienti. Essi riuniscono il sensing, attuazione e processamento dei dati, informatica e comunicazione, essendo in grado non solo di sentire, ma anche di diagnosticare, descrivere e gestire qualsiasi situazione si presenti aprendo la strada nuove applicazioni.

Questo tipo di sistemi intelligenti rappresenteranno la base per l'Internet of Things (IoT) garantendo un basso consumo di energia, basso fattore di forma (dovuto alla necessità di avere piccoli sensori wireless) e basso costo. Ci sono, tuttavia, alcuni problemi ancora da affrontare e su cui la ricerca è attiva, come nuovi metodi di sensing (gas/chemical sensing), la standardizzazione dei dispositivi (vista la richiesta di volumi limitati di dispositivi che non permettono di sviluppare un sensore per ogni tipo di applicazione a causa dei costi), l'immagazzinamento di energia altamente

efficiente (sottili batterie devono alimentare tutti i dispositivi integrati) e il ricetrasmittente a bassa potenza.

Nonostante alcune difficoltà tecniche, il mercato dei MEMS è molto attivo e in via di sviluppo grazie soprattutto alla tecnologia che sta alla base della fabbricazione, le dimensioni ridotte e il costo basso, che rende tale dispositivo molto appetibile. [k]

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kovacs T.A. Gregory, Maluf I. Nadim, Petersen E. Kurt, 1998, "Bulk Micromachining of Silicon", Proceedings of the IEEE, vol 86, n.8, pp.1537-1551
- [2] De Biasi Matteo, 2010, "Inclinometri in Tecnologia MEMS", Tesi di laurea magistrale in ingegneria mecatronica Università degli studi di Padova, pp 3-42
- [3] Baustillo M. James, Howe T. Roger, Muller S. Richard, 1998, "Surface micromachining for Microelectromechanical Systems", Proceedings of the IEEE, vol 86, n.8, pp.1552-1574
- [4] Andrejasic Matej, 2008, "MEMS ACCELEROMETERS", Seminar
- [5] Shaeffer K. Derek, April 2013, "MEMS Inertial Sensors: A Tutorial Overview", IEEE Communication Magazine, pp.100-109
- [6] Rucatti Daniele, 2010, "Sviluppi di applicazione basati su Wiimote per scopi didattici", Tesi di laurea in Ingegneria dell'informazione Università degli studi di Padova, pp.13-19
- [7] Castro Andrea, 2010, "Sviluppo di una metodologia per l'ottimizzazione di prove sperimentali per la caratterizzazione di giroscopi MEMS monoassiali e biassiali", Tesi specialistica in Ingegneria meccanica Politecnico di Milano, pp.19-27
- [8] Micromechanical System, (https://www.utwente.nl/ewi/tst/education/elbach/mandt/extra/background/mems_sensors.pdf), 17 settembre 2015
- [9] Chen Weihai, Chen Wenjie, Jiang Jun, Liu Jingmeng, 2013, "A MEMS Based Sensor for Large Scale Force Measurement", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.1278-1283
- [10] Koen Van Caekenberghe, January 2012, "Modeling RF MEMS Devices", IEEE microwave magazine, pp.83-110
- [11] The Future of MEMS, (<https://sem.org/PDF/s01p01.pdf>), 6 ottobre 2015
- [12] Polla L. Dennis, 2001, "BioMEMS applications in Medicine", IEEE International Symposium on Micromechatronics and Human Science, pp.13-15

Sittografia

- [a] Processo LIGA (<http://www.plasma.de/it/glossary/584-0-processo-liga.html>)
- [a] What is MEMS technology? (<http://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>)
- [b] Wafer ([http://www.wikipedia.org/wiki/wafer_\(elettronica\)](http://www.wikipedia.org/wiki/wafer_(elettronica)))
- [c] Fotolitografia (<http://www.treccani.it>)
- [d] Chemiosorbimento (<http://www.wikipedia.it>)
- [e] Trasduttore (<http://www.elettronicafree.altervista.org>)
- [f] Estensimetro (<http://www.wikipedia.org/wiki/Estensimetro>)
- [g] Perdita d'inserzione (http://www.wikipedia.org/wiki/Insertion_loss)
- [h] Radiazione acustica (<http://www.provinz.bz.it/vmwetogentur>)
- [i] MEMS Testing (<http://www.memsjournal.com/2015/11/mems-testing-eight-fabrication-problems-you-cannot-see-with-a-microscope.html>)
- [j] Mechanical testing of MEMS devices, challenges and opportunities
(<http://www.memsjournal.com/2015/06/mechanical-testing-of-mems-devices-challenges-and-opportunities-.html>)
- [k] The future of MEMS in IoT (<http://electroi.com/blog/2015/09/the-future-of-mems-in-the-iot>)