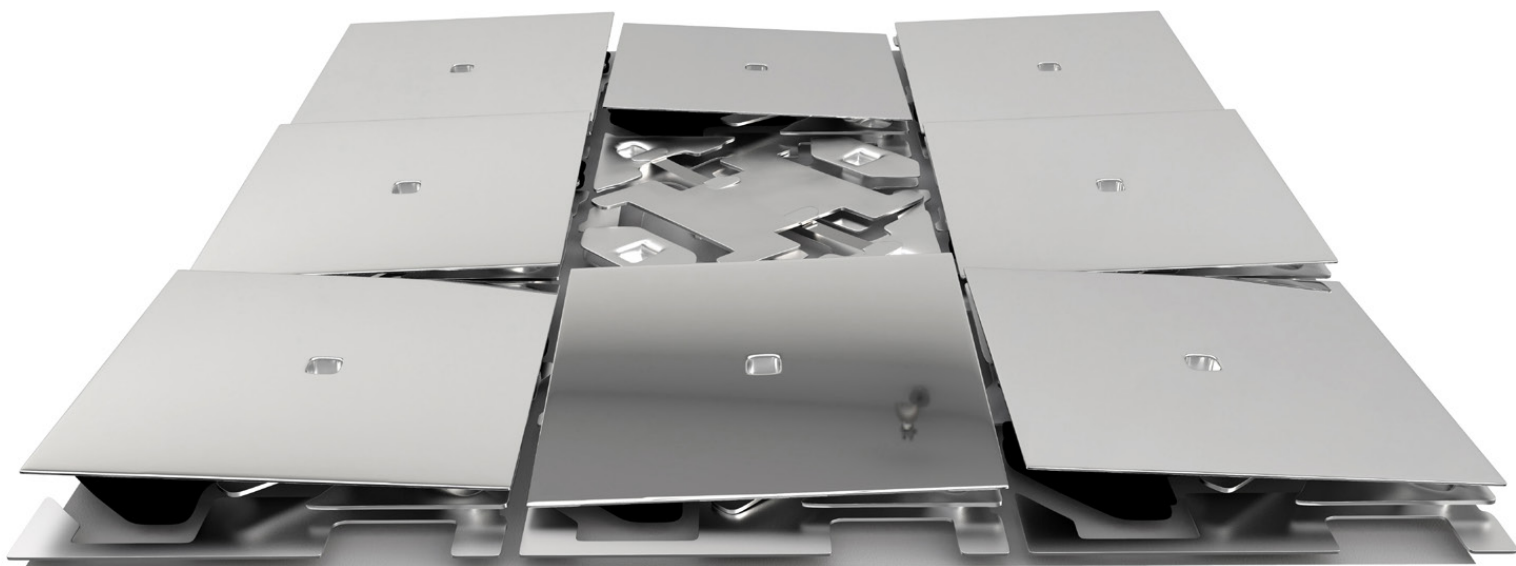


I sistemi microelettromeccanici e le loro applicazioni



I MEMS (MicroElectroMechanical System) sono complessi insiemi di dispositivi elettronici e meccanici integrati nello stesso chip di silicio attraverso processi di microfabbricazione che estendono quelli della microelettronica. Le loro applicazioni sono molteplici. Vediamo il loro utilizzo in sensori, attuatori ed energy harvesting

Marco Baù, Alessandro Nastro, Marco Ferrari e Vittorio Ferrari (Università di Brescia)

La tecnologia MEMS oggi rappresenta un'opzione sempre più diffusa per la sensoristica, specialmente nelle applicazioni orientate al contenimento di costi e dimensioni su ampi volumi di pezzi. Sensori di pressione, di flusso, accelerometri, giroscopi, microfoni sono solo alcuni esempi di MEMS che già pervadono i campi automotive, consumer e industrial affacciandosi su nuovi settori quali healthcare e IoT [1]. Molti sensori MEMS prevedono nel loro principio di funzionamento la presenza di attuatori interni basati sull'utilizzo di processi standard di microfabbricazione del silicio che consentono meccanismi di trasduzione elettromeccanica quali per esempio quello elettrostatico o elettrotermico, basati rispettivamente sulla forza elettrostatica tra armature di microcondensatori e la dilatazione termica di microstrutture localmente riscaldate da corrente elettrica [2]. La combinazione di funzionalità di rilevazione

e attuazione incorporate nello stesso dispositivo MEMS consente di realizzare anelli di retroazione elettromeccanica, ampiamente usati per esempio nei microaccelerometri capacitivi a bilanciamento elettrostatico, e permette di investigare soluzioni basate su servomeccanismi integrati [3].

Un importante fattore che consente di espandere significativamente le potenzialità applicative dei MEMS, aprendo il campo a funzionalità nuove, consiste nella possibilità di integrare in silicio materiali non standard che consentano di sfruttare particolari principi di trasduzione.

Un esempio rilevante è dato dalla recente maturità tecnologica raggiunta nell'integrazione di materiali che presentano l'effetto piezoelettrico, consistente nella generazione di un segnale elettrico in risposta a una sollecitazione meccanica e, reciprocamente, in una azione meccanica prodotta da uno stimolo elettrico, dando vita alla neonata

●
●
●
● **L'effetto piezoelettrico consiste nella generazione di un segnale elettrico in risposta a una sollecitazione meccanica e viceversa**

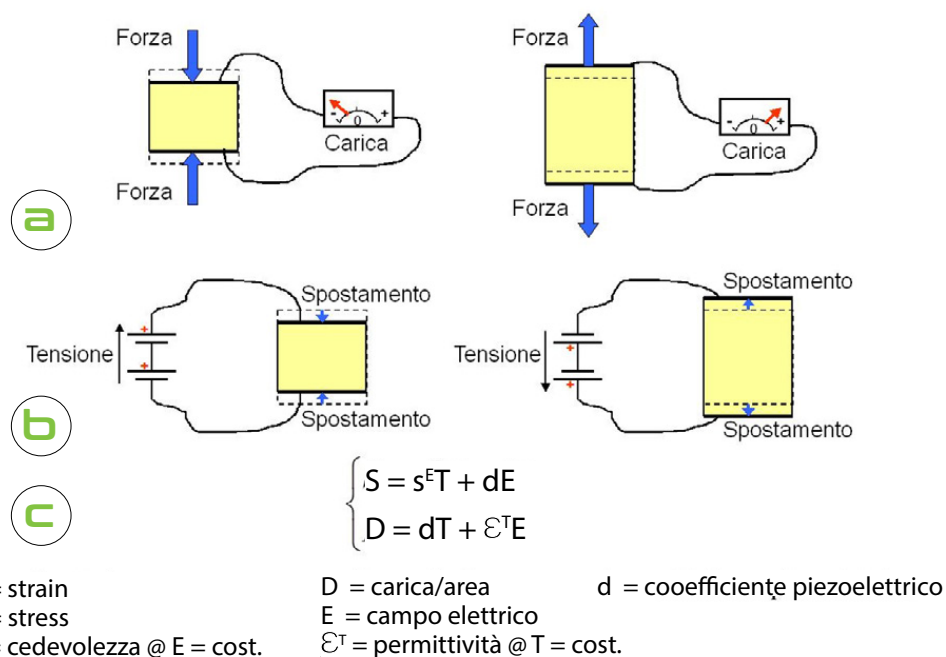


Figura 1 – Effetto piezoelettrico diretto (a), inverso (b), equazioni costitutive (c)

classe dei MEMS piezoelettrici, o piezoMEMS. I MEMS piezoelettrici rappresentano, da un lato, un ambito di ricerca attuale, ampio e molto vitale che studia tecnologie, dispositivi e applicazioni, ma, nel contempo, offrono ormai un rilevante numero di soluzioni concrete e dispositivi commerciali con previsioni di costante crescita. Testine di stampa ink-jet, giroscopi, risonatori, trasduttori a ultrasuoni (PMUT - Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers), filtri e switch a radiofrequenza, attuatori per microspecchi e microsistemi ottici autofocus, microfoni sono solo alcuni dei dispositivi e degli ambiti oggi coperti da produttori di dispositivi quali ST Microelectronics, Rohm, Bosch e aziende IDM (Integrated Device Manufacturer) quali TDK-Invensense, Chirp Microsystems e Vesper [4].

In questo scenario, viene di seguito richiamato l'effetto piezoelettrico e le principali peculiarità della sua applicazione nel campo dei MEMS, e vengono presentate alcune attività di ricerca in cui sono impegnati gli autori, anche nell'ambito di collaborazioni internazionali, che hanno portato allo sviluppo di prototipi di MEMS piezoelettrici per sensori, attuatori e energy harvesting.

Effetto piezoelettrico in MEMS

L'effetto piezoelettrico, dal greco antico "elettricità indotta dalla pressione", è la proprietà di una classe di materiali, generalmente isolanti, per i quali una forza produce uno sbilanciamento di carica elettrica e, reciprocamente, una tensione determina una deformazione meccanica. Il primo e il secondo fenomeno sono definiti rispettivamente effetto piezoelettrico diretto e inverso (Figg. 1a e 1b).

Si tratta di un fenomeno di trasduzione elettromeccanica lineare, in cui causa ed effetto sono tra loro proporzionali. Le equazioni costitutive che lo descrivono (Figura 1c) rappresentano un elemento meccanico elastico in cui è prodotta una sollecitazione aggiuntiva per via elettrica e, reciprocamente, un elemento dielettrico in cui è indotta una carica addizionale per via meccanica. Il coefficiente piezoelettrico d è una proprietà del materiale che quantifica il grado di accoppiamento tra i domini meccanico ed elettrico.

I materiali piezoelettrici devono la loro proprietà a una asimmetria interna nella distribuzione delle cariche elettriche positive e negative che, a segui-

to di deformazione meccanica, si manifesta come uno sbilanciamento netto di carica agli elettrodi. Tale asimmetria può essere intrinseca, come nei materiali piezoelettrici propriamente detti quali il quarzo, oppure indotta da un pre-trattamento di orientazione dei dipoli del materiale detto polarizzazione (poling) ottenuto mediante applicazione di campo elettrico a temperatura ambiente o maggiore, come accade nelle ceramiche polarizzate. Ne risulta che i materiali che manifestano piezoelettricità intrinsecamente sono, o sono resi, anisotropi, ossia le loro proprietà dipendono dalla direzione. Pertanto le grandezze nelle equazioni costitutive normalmente includono i pedici 1, 2 e 3 a rappresentare le direzioni spaziali x, y e z, con la convenzione che la direzione 3 è quella di polarizzazione. Ne deriva che, per un dato materiale, il coefficiente piezoelettrico d33 quantifica la trasduzione in cui grandezze elettriche e meccaniche sono entrambe dirette lungo z (effetto longitudinale), mentre il coefficiente piezoelettrico d31 si riferisce al caso in cui grandezze elettriche e meccaniche sono rispettivamente dirette lungo z e x (effetto trasversale).

La linearità dell'effetto piezoelettrico, rispecchia-

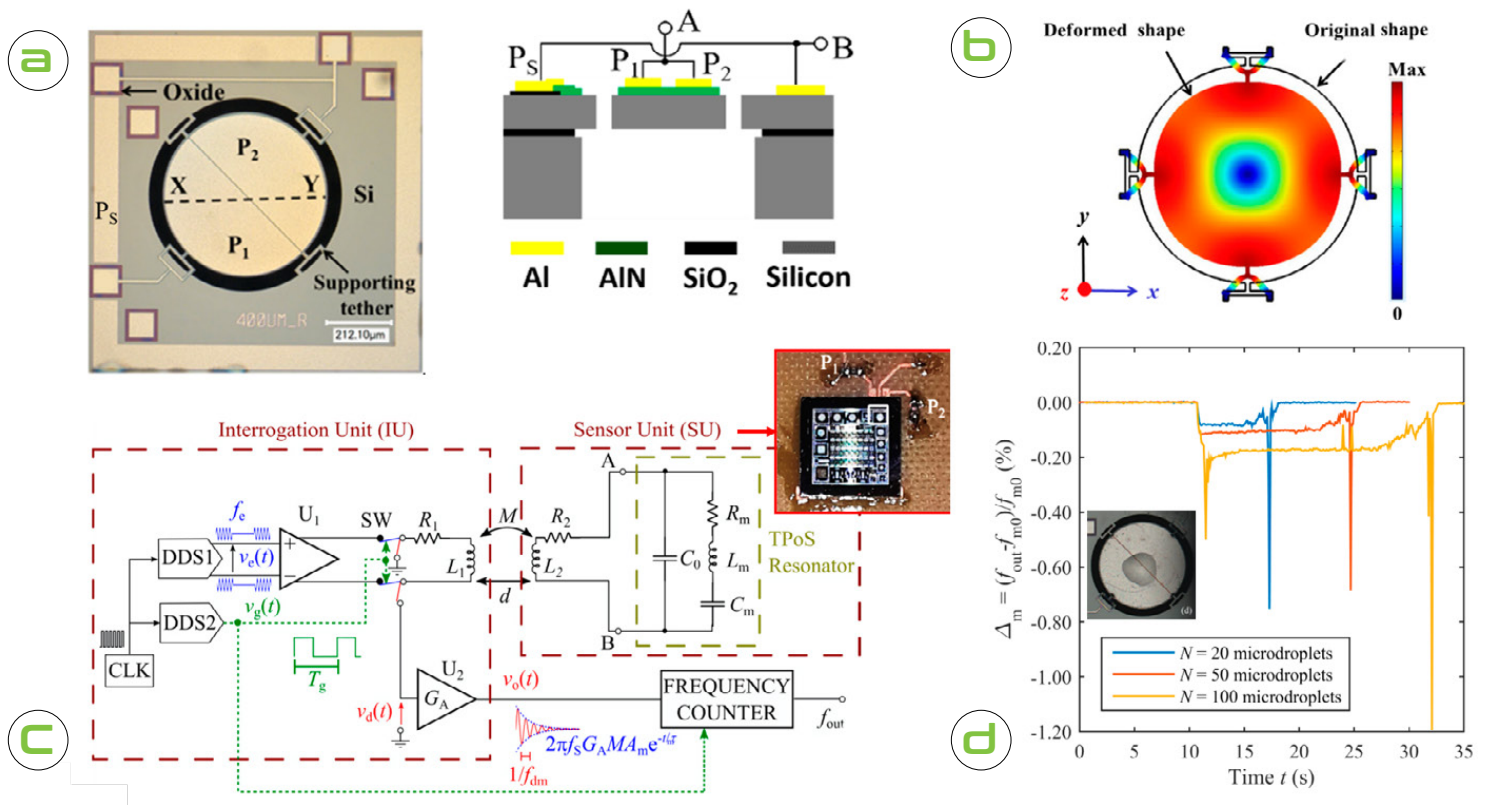


Figura 2 – Microsensore risonante piezoelettrico MEMS a interrogazione contactless: struttura Sol con film piezoelettrico di AlN (a), primo modo radiale (b), circuito elettronico di interrogazione (c), frequenza di risonanza del sensore usato come microbilancia durante la deposizione ed evaporazione di microgocce (d)

ta nelle equazioni costitutive, ha la fondamentale conseguenza pratica che conserva il segno, ossia se in un determinato elemento una tensione positiva produce un allungamento, l'inversione della tensione causa una contrazione. Ciò rappresenta un vantaggio essenziale nella realizzazione di attuatori che funzionano simmetricamente in modalità push-pull. Allo stesso modo, invertire il segno della forza applicata produce l'inversione di polarità della carica indotta, permettendo direttamente la realizzazione di sensori che producono un segnale bipolare in risposta a trazione e compressione nel materiale.

Nei MEMS gli elementi piezoelettrici sono integrati prevalentemente nella forma di film sottili, con spessore di solito non superiore a pochi microme-

tri [5], ma è stato investigato anche l'impiego di spessori maggiori [6]. Tra i metodi di deposizione oggetto di ricerca e sperimentazione, quelli che a oggi hanno raggiunto un'adeguata compatibilità coi processi di microfabbricazione del silicio e sono impiegati in piezoMEMS commerciali sono essenzialmente la deposizione per sputtering e per sol-gel [7].

I materiali maggiormente usati per film piezoelettrici in piezoMEMS sono PZT (zirconato-titanato di piombo) in varie composizioni e AlN (nitruro di alluminio). Meno diffuso è l'impiego di ZnO (ossido di zinco) e altri materiali, tra cui KNN (niobato di

- È stata sviluppata
- una tecnica che consente
- di leggere la frequenza
- di risonanza del
- microrisonatore in modalità
- contactless a corto raggio

sodio e potassio) che rappresenta una delle alternative lead-less più promettenti per sostituire il PZT che, a causa della presenza di piombo, è soggetto a limitazioni di compatibilità in alcune applicazioni.

Dato che un materiale piezoelettrico deposto in forma di film subisce un vincolo di irrigidimento in direzione planare esercitato dalla reazione del substrato, i coefficienti piezoelettrici dei materiali usati in piezoMEMS sono di solito indicati includendo il pedice "f", per film. Dunque $d_{33,f}$ indica il coefficiente piezoelettrico in direzione 3, ossia z, per un piezofilm su substrato. Dato un materiale, $d_{33,f}$ è inferiore a d_{33} per il film idealmente staccato dal substrato [5-7].

A seconda del materiale e del processo di deposizione, i film piezoelettrici già nella forma così come depositi (as prepared) possono vantaggiosamente presentare un certo grado di allineamento preferenziale dei dipoli. Ciò si ottiene, in particolare sia per AlN sia per PZT, utilizzando specifici processi di deposizione orientata, abbinati a eventuale funzionalizzazione del substrato con strati di interfaccia per consentire crescita epitassiale.

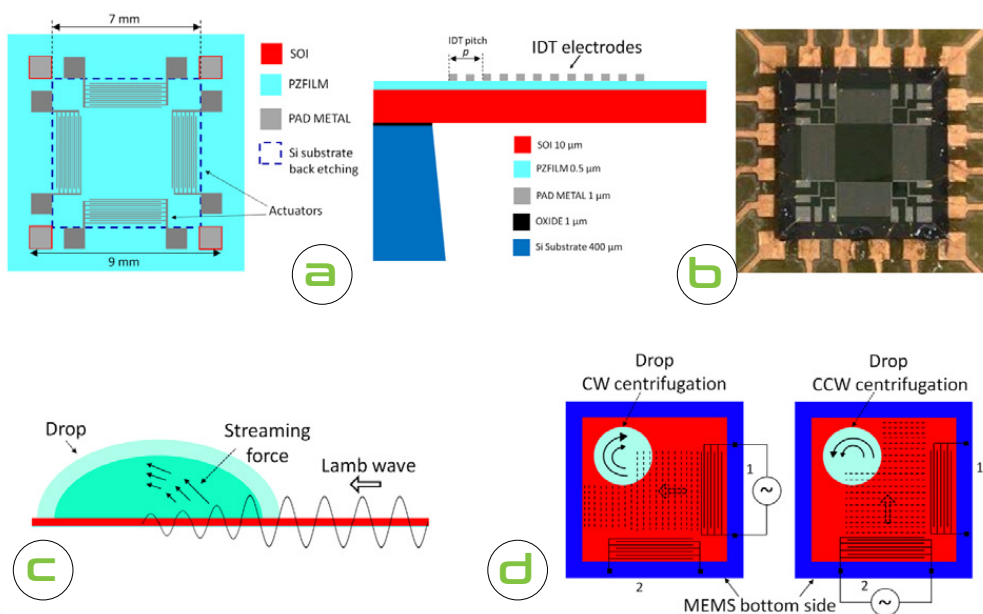


Figura 3 – MEMS piezoelettrico a generazione di onde di Lamb per attuazione microfluidica: struttura Sol con film piezoelettrico di AIN (a), immagine del dispositivo (b), meccanismo di attuazione in liquido a contatto col substrato (c), processo di centrifugazione di gocce in senso orario/antiorario a seconda della posizione rispetto agli attuatori IDT (d)

Disporre di adeguate proprietà piezoelettriche nei film as prepared, senza che si renda necessario il trattamento di polarizzazione, rappresenta un fattore di significativa importanza per consentire la produzione di piezoMEMS su grandi volumi senza l'aggravio di passi di processo aggiuntivi.

Esempi di PiezoMEMS

Microsensore risonante a interrogazione contactless

I risonatori piezoelettrici MEMS sono usati come riferimenti di frequenza, filtri e sensori [7]. In particolare, i microrisonatori piezoelettrici possono operare come sensori a microbilancia nei quali una piccola massa deposta sul risonatore può essere rilevata con elevata sensibilità misurando l'alterazione della frequenza di risonanza. È così possibile, per esempio, rilevare specie chimiche o biologiche in gas e liquido adsorbite sulla superficie del sensore attraverso la variazione di frequenza prodotta.

In questo ambito, Figura 2a mostra un risonatore piezoMEMS realizzato in collaborazione con la City University di Hong Kong, basato su substrato

silicon-on-insulator (Sol) con film di AIN deposto su un disco di silicio nel quale, per effetto trasversale di tipo 31, sono eccitate vibrazioni radiali assialsimmetriche (contour mode) [8].

Il disco ha diametro di 400 μm ed è ancorato alla cornice esterna attraverso quattro supporti elastici posizionati simmetricamente sulla circonferenza. Il primo modo di risonanza radiale è rappresentato dai risultati di simulazioni a elementi finiti di Figura 2b e ha una frequenza di 6.3 MHz. Il microrisonatore è configurato elettricamente come un bipolo che può essere modellizzato in forma equivalente da un circuito LmCmRm serie, che rappresenta il ramo associato al comportamento meccanico, in parallelo a una capacità C0 associata al comportamento elettrico.

È stata sviluppata una tecnica innovativa che consente di leggere la frequenza di risonanza del microrisonatore in modalità contactless a corto raggio, così che esso possa funzionare come un sensore posizionabile in ambienti chiusi, inaccessibili o non compatibili con collegamenti cablati. La tecnica, illustrata nello schema a blocchi di Figura 2c, si basa sull'accoppiamento magnetico

tra una microspira connessa al microrisonatore a bordo dell'unità sensore totalmente passiva (Sensor Unit - SU) e una spira collegata all'unità elettronica di interrogazione (Interrogation Unit - IU) posta in prossimità.

Attraverso l'alternarsi di una fase di eccitazione del microrisonatore seguita da una fase di rilevazione della risposta di vibrazione libera, la tecnica e il circuito sviluppati consentono il fondamentale vantaggio, rispetto a soluzioni simili, che la lettura della frequenza di risonanza favorevolmente non dipende dalla distanza tra SU e IU entro un campo di circa 2 cm.

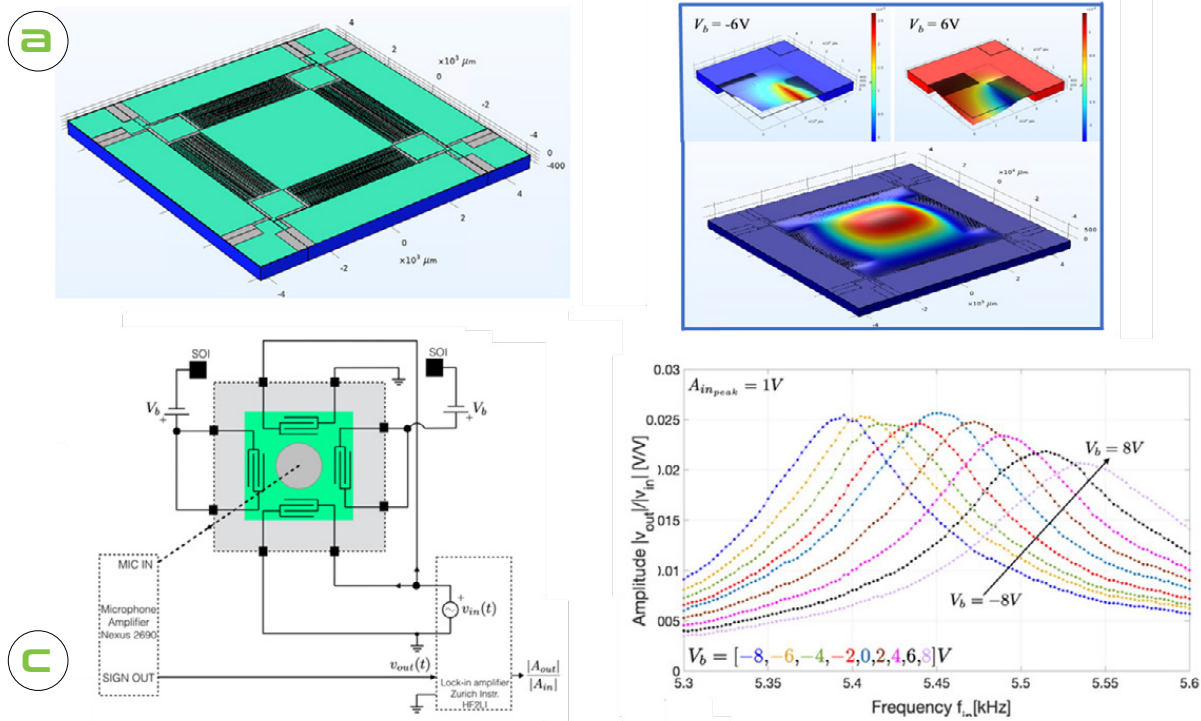
Figura 2d mostra i risultati sperimentali ottenuti misurando la frequenza di risonanza del microrisonatore usato come sensore a microbilancia durante le fasi di deposizione e successiva evaporazione di microgocce di liquido sulla sua superficie. I risultati consentono di analizzare la complessa dinamica del fenomeno e confermano l'applicabilità del dispositivo sviluppato come microbilancia a interrogazione contactless.

Microattuatori a onde acustiche

Un film piezoelettrico pilotato da una tensione alternata consente di eccitare vibrazioni meccaniche nel substrato che si propagano sotto forma di onde acustiche e possono accoppiarsi al mezzo circostante trasferendo energia e, nel caso il mezzo sia aria, generando suono o ultrasuoni a seconda della frequenza di eccitazione. Su scala MEMS l'effetto è già oggi utilizzato per esempio nei PMUT ed è oggetto di crescenti interessi di ricerca nel settore della acustofluidica che riguarda lo studio delle interazioni tra onde acustiche e fluidi e delle applicazioni che ne possono derivare, per esempio in campo biomedico.

Come esempio di piezoMEMS per acustofluidica, Figura 3a mostra un dispositivo, realizzato in collaborazione con Université Grenoble Alpes e Institut Polytechnique de Grenoble, in tecnologia silicon-on-insulator (Sol) con film di AIN [9].

La struttura ha la forma di un diaframma quadrato di 6 mm di lato e circa 10 μm di spessore sulla superficie superiore del quale è deposto il film di AIN di spessore 1 μm . Sul film ai quattro lati del diaframma sono realizzati quattro coppie di elet-



b Figura 4 – Trasduttore acustico MEMS piezoelettrico con risonanza accordabile elettricamente: struttura SOI con film piezoelettrico di AlN (a), primo modo flessionale (b), meccanismo di comando degli IDT per generazione acustica in aria e contemporanea attuazione statica per tuning della risonanza (c), ampiezza del segnale acustico sinusoidale emesso dal MEMS in funzione della frequenza al variare della tensione di tuning (d)

trodi interdigitati (IDT - InterDigital Transducer) con passo di $120 \mu\text{m}$. Figura 3b mostra un'immagine del MEMS.

Ciascuna delle quattro coppie di IDT sul film piezoelettrico, eccitata con una tensione alternata di frequenza opportuna, opera come attuttore producendo sollecitazioni periodiche che si propagano nel diaframma come onde di Lamb, caratterizzate da moto flessionale con lunghezza d'onda maggiore dello spessore del substrato. Un liquido in contatto con la parte inferiore del diaframma è soggetto a un complesso campo di forze prodotte dalle onde nel substrato. In particolare, se il liquido è nella forma di goccia, come rappresentato in Figura 3c, si instaurano in essa deformazione e moti interni ordinati, fino a traslazione o vaporizzazione del liquido.

Figura 3d mostra le configurazioni sperimentali in cui una goccia di liquido sul diaframma è stata eccitata dalle onde prodotte pilotando alternativamente due IDT con assi perpendicolari. Mediante filmati al microscopio è stato osservato come le due configurazioni di eccitazione inducano nella goccia, in forma controllabile e ripetibile, una centrifugazione in senso orario e antiorario rispettivamente. Ciò consentirebbe, per esempio, di effettuare miscelazione di microvolumi di fluido

in applicazioni lab on chip. Ulteriori esperimenti in corso con lo stesso dispositivo stanno dimostrando la possibilità di movimentare e allineare per via acustica microparticelle disperse nel liquido, promettendo la trasferibilità alla movimentazione di cellule in soluzione di coltura.

Lo stesso piezoMEMS sopra descritto, riportato in Figura 4a, è stato impiegato per studiare l'emissione e la ricezione di onde acustiche in aria. Attraverso i segnali applicati e ricevuti agli elettrodi è stato possibile attuare e rilevare vibrazioni flessionali piston-like del diaframma, come rappresentato in Figura 4b. È stato utilizzato il primo modo a frequenza di circa $5,5 \text{ kHz}$, ossia in campo udibile.

È stata investigata la possibilità di variare la frequenza di risonanza attraverso un meccanismo di accordatura (tuning) delle caratteristiche meccaniche del diaframma controllato per via elettrica. Allo scopo, per due dei quattro IDT, è stata adottata una configurazione elettrica specifica che usa gli IDT cortocircuitati e l'elettrodo di substrato tra cui è applicata una tensione continua V_b , come illustrato in Figura 4c. Ciò consente di sfruttare il modo 31 nel film di AlN per indurre una sollecitazione statica planare nel diaframma, compressiva o tensile a seconda del segno di V_b , che determina

una corrispondente diminuzione o crescita della frequenza di risonanza. Il principio è stato confermato sperimentalmente sia in configurazione di trasmettitore sia di ricevitore come mostrato dai risultati di Figura 4c che dimostrano un'accordabilità di circa il 5% nell'intervallo di V_b esplorato. Il tuning elettrico di trasduttori acustici può rivelarsi utile per migliorare l'efficacia di trasmissione/ricezione attraverso un accoppiamento ottimale delle rispettive frequenze.

Energy harvesting da vibrazioni

La conversione di energia disponibile in ambiente (energy harvesting) per alimentare sensori e microsistemi stand-alone rappresenta una prospettiva promettente per superare le limitazioni dell'uso di batterie che necessitano di ricarica/sostituzione periodica. L'effetto piezoelettrico è stato ampiamente dimostrato essere efficace per energy harvesting da vibrazioni meccaniche in prototipi di taglia macro e, scalando favorevolmente con la diminuzione delle dimensioni, richiama forti interessi di ricerca per studiare convertitori di energia mecanolettrici in tecnologia MEMS. In generale, l'efficacia di conversione è massima alla risonanza dell'elemento meccanico elastico

Passione, Innovazione e Problem Solving

TECNOLOGIA E COMPETENZA PER UN PRODOTTO CHIAVI IN MANO.

Nortech Elettronica è EMS (Electronic Manufacturing Services).

Gestiamo il processo produttivo dalla sua progettazione, curandone l'industrializzazione, l'assemblaggio e il collaudo del prodotto finito.



SERVIZI INTEGRATI

- Progettazione
- Industrializzazione
- Approvvigionamento
- Produzione
- Collaudo
- Post vendita



SETTORI

- Ferroviario
- Automotive
- Automazione Industriale
- Domotica
- Medica
- ... e altri

NON CI LIMITIAMO A CERCARE SOLUZIONI. IL NOSTRO OBIETTIVO È POTENZIARE L'EFFICIENZA AL SUO MASSIMO, SUPERANDO I LIMITI, CREANDO INNOVAZIONE.



Indirizzo: Via O. Palme, 13/15 - 40062 Molinella BO - Italy

Telefono: +39.051.887.714

Sito Internet: www.nortechelettronica.it

Email: info@nortechelettronica.it

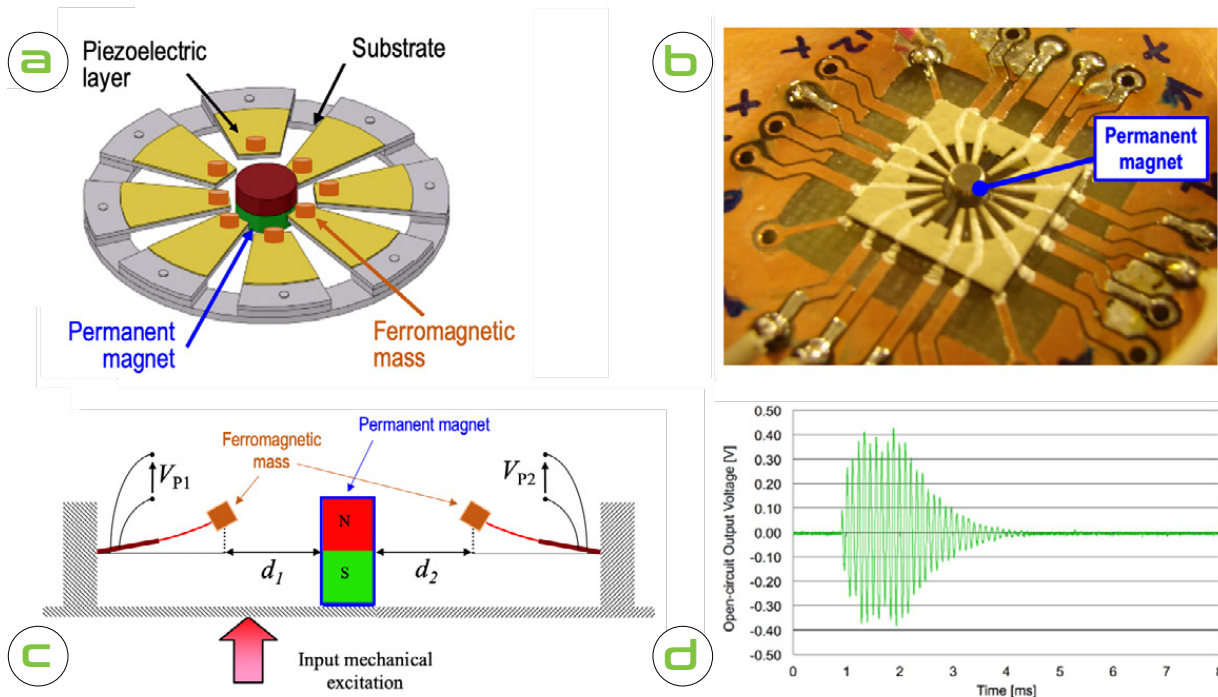


Figura 5 – Multi-convertitore MEMS piezoelettrico non lineare per energy harvesting da vibrazioni: struttura basata su insieme di cantilever (a), immagine del dispositivo in silicio con film di PZT deposto per serigrafia (b), meccanismo non lineare basato su interazione tra magnete e massa ferromagnetica sui cantilever (c), tensione a vuoto generata da un cantilever in assenza di magnete, in risposta a sollecitazione impulsiva (d)

che forma il convertitore. Tuttavia, essendo le vibrazioni ambientali normalmente caratterizzate da spettro variabile distribuito su una banda di frequenze che difficilmente eccede poche centinaia di hertz, esiste un'intrinseca penalizzazione nell'utilizzo di convertitori MEMS risonanti che generalmente hanno picchi di risposta stretti e collocati nella regione dei kilohertz. Tra le tecniche maggiormente studiate per affrontare il problema figurano l'uso di matrici che combinano convertitori multipli con risonanze differenti per ottenere un allargamento della banda equivalente o lo sfruttamento di vari meccanismi di non

linearità che consentono di traslare la risposta del convertitore verso le basse frequenze. Una soluzione innovativa che combina gli approcci multi-convertitore e non lineare su scala MEMS è stata proposta e realizzata in forma di prototipo [11].

Le Figg. 5a e 5b mostrano rispettivamente lo schema di principio del multi-convertitore non lineare formato da cantilever piezoelettrici di lunghezze differenti e la sua realizzazione in silicio tramite deposizione in post-processing di film di PZT mediante stampa serigrafica a partire da una pasta a bassa temperatura di stabilizzazione.

Figura 5c illustra il meccanismo di non linearità che è basato sull'interazione tra un piccolo magnete a magnetizzazione verticale fissato sulla base e masse ferromagnetiche collocate sulla punta dei cantilever. Al decrescere delle distanze imposte tra magnete e punta dei cantilever, si instaura un grado crescente di non linearità fino alla bistabilità [12]. Figura 5d riporta l'andamento tipico della tensione a vuoto per un cantilever in assenza di magnete in risposta a eccitazione meccanica impulsiva di pochi g sulla base. L'uscita è qualitativamente ben rilevabile, sebbene di livello inferiore a 1 V_{pp}.

Note

- [1] <https://eu.mouser.com/applications/mems-technology/>
- [2] Algami et al., "A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices", in *Nanoscale Res Lett*, (2021) 16:16.
- [3] A. Nastro, M. Ferrari, V. Ferrari, "Double-Actuator Position-Feedback Mechanism for Adjustable Sensitivity in Electrostatic-Capacitive MEMS Force Sensors", in *Sensors and Actuators A*, 312, (2020) 112127.
- [4] J. Mouly, *Piezoelectric Devices - from Bulk to Thin-Film*, 2019, Yole Development, www.yole.fr.
- [5] S. Trolier-McKinstry, P. Muralt, "Thin

- Film Piezoelectrics for MEMS", in *Journal of Electroceramics*, 12 (2004) 7–17.
- [6] V. Ferrari, "Printed thick-film piezoelectric and pyroelectric sensors", in *Printed films: Materials science and applications in sensors, electronics and photonics*, M. Prudenziati and J. Hormadaly (Eds.), 2012, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (UK), Ch. 9, 221-258. ISBN: 978 1 84569 988 8
- [7] S. Tadijadi, K. Mateti, "Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives", in *Meas. Sci. Technol.*, 20 (2009), 092001.
- [8] M. Baù, M. Ferrari, H. Begum, A. Ali, J. E.-Y. Lee, V. Ferrari, "Technique and Circuit

- for Contactless Readout of Piezoelectric MEMS Resonator Sensors", in *Sensors*, 20, (2020) 3483.
- [9] M. Demori, M. Baù, M. Ferrari, S. Basrou, L. Rufer, V. Ferrari, "MEMS Device with Piezoelectric Actuators for Driving Mechanical Vortexes in Aqueous Solution Drops", in *Proc. 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems - Transducers 2019 & Eurosensors XXXIII*, Berlin, June 23-27, 2019, 2318-2321.
- [10] A. Nastro, L. Rufer, M. Ferrari, S. Basrou, V. Ferrari, "Piezoelectric Micromachined Acoustic Transducer with Electrically-Tunable Resonant Frequency", in *Proc.*

- 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems - Transducers 2019 & Eurosensors XXXIII, Berlin, June 23-27, 2019, 1905-1908.
- [11] M. Baù, M. Ferrari, V. Ferrari, "Piezoelectric Multi-Frequency Nonlinear MEMS Converter for Energy Harvesting from Broadband Vibrations", in *Sensors and Microsystems, Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer International Publishing, Vol. 629, 2020, 265-271.
- [12] M. Baù, D. Alghisi, S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, "Multi-Frequency Array of Nonlinear Piezoelectric Converters for Vibration Energy Harvesting", in *Smart Mater. Struct.*, 29, 8, (2020) 085047 (18pp).