

pMEMS: oscillatori MEMS di prossima generazione

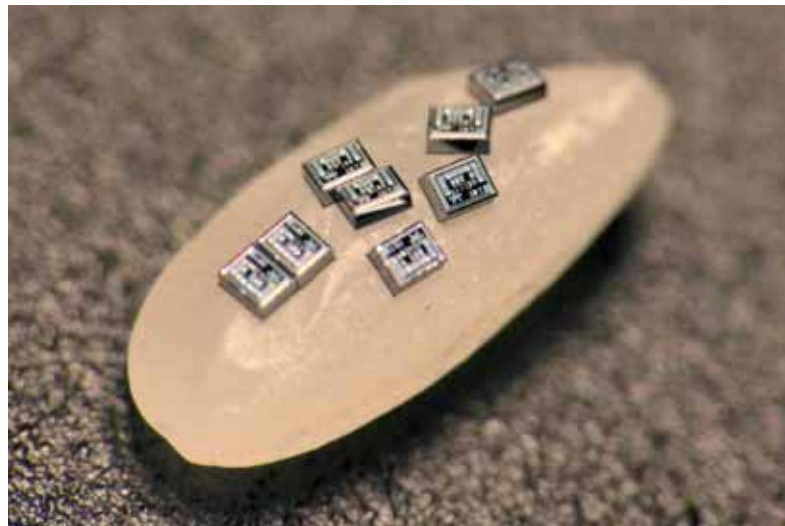
Harmeet Bhugra
IDT

Idt ha sviluppato un nuovo dispositivo di temporizzazione che, abbinando uno strato di materiale piezoelettrico con una struttura microelettromeccanica in silicio, offre numerosi vantaggi tra cui diminuzione dei costi, riduzione degli ingombri e maggiore stabilità nel tempo

Nel corso degli ultimi decenni, i risonatori (XTAL) e gli oscillatori (XO) basati sui cristalli di quarzo sono stati impiegati come riferimenti di frequenza in quasi tutti i sistemi elettronici grazie alla loro stabilità e alle eccellenti prestazioni elettriche, come il basso rumore di fase e la stabilità della frequenza. Per superare le limitazioni in termini di prestazioni e risolvere i problemi legati all'affidabilità degli oscillatori al quarzo, sono numerose le tecnologie alternative che hanno tentato di rimpiazzare i quarzi in anni recenti, inclusi gli oscillatori MEMS e CMOS. Queste nuove tecnologie garantiscono una miglior robustezza contro gli urti e le vibrazioni, hanno dimensioni più compatte e possono sfruttare i vantaggi dell'integrazione monolitica. Comunque, rispetto ai dispositivi al quarzo, le loro prestazioni devono essere migliorate specialmente per le applicazioni che prevedono segnali di riferimento ad alta frequenza. I risonatori a trasduzione piezoelettrica pMEMS si sono proposti come validi candidati al posto dei quarzi tradizionali per applicazioni ad alta frequenza e basso rumore di fase. In questo articolo sono illustrati i principi di progettazione e le caratteristiche prestazionali degli oscillatori pMEMS sviluppati da IDT. Test di resistenza agli urti e alle vibrazioni, unitamente a misure di stabilità a lungo termine, hanno dimostrato che gli oscillatori pMEMS sono sostituti affidabili ed economici degli oscillatori basati sui cristalli di quarzo in applicazioni di temporizzazione ad alta frequenza.

Il risonatore pMEMS

Come indica il nome stesso, il risonatore pMEMS è composto da un materiale piezoelettrico (AIN) con un singolo cristallo di silicio (SCS), combinando i vantaggi dei risonatori piezoelettrici al quarzo con quelli dei risonatori MEMS



in silicio. Diversamente dai tipici risonatori capacitivi in silicio, i risonatori pMEMS non richiedono alcuna tensione continua di polarizzazione per funzionare. Questi risonatori pMEMS composti offrono una miglior impedenza cinetica e una gestione più lineare della potenza, oltre a garantire un'eccellente stabilità di frequenza a lungo termine. Grazie all'elevato accoppiamento elettromeccanico del materiale piezoelettrico, alla stabilità e al ridotto smorzamento del SCS, i risonatori pMEMS offrono una resistenza cinetica molto bassa e un fattore di qualità eccellente. La figura 1 riporta uno schema del risonatore pMEMS con uno strato piezoelettrico e gli elettrodi impilati sopra lo strato di SCS.

Uno stimolo elettrico è applicato a uno degli elettrodi superiori per eccitare lo strato piezoelettrico in cui il coefficiente piezoelettrico trasversale e_{31} è utilizzato per generare un'onda acustica nell'intero dispositivo. Il risonatore conseguentemente vibra lateralmente e il movimento meccanico viene trasdotto attraverso lo strato piezoelettrico che viene rileva-

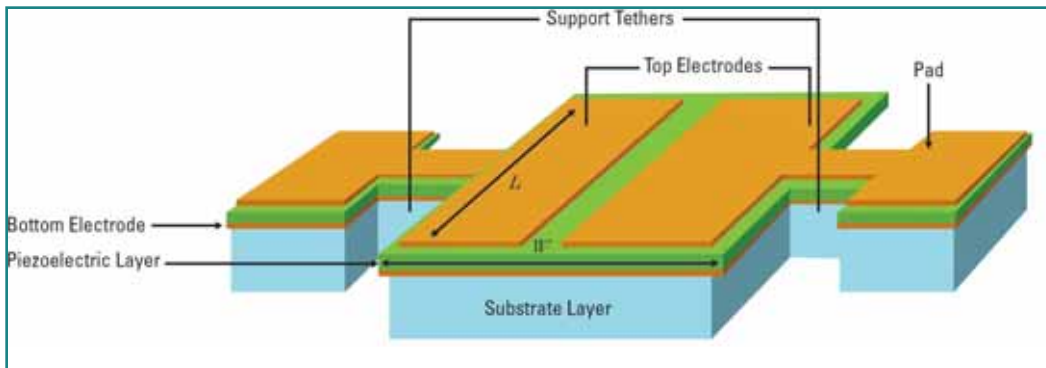


Fig. 1 - Schema di un risonatore pMEMS

to dall'altro elettrodo superiore. La frequenza di risonanza del modo fondamentale è determinata dalla lunghezza laterale del dispositivo L , dalla costante elastica efficace E_{eff} del corpo del combinato risonatore e dalla densità efficace della massa ρ_{eff} .

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot L} \sqrt{\frac{E_{eff}}{\rho_{eff}}}$$

A causa della dispersione dell'onda acustica in diverse direzioni nel corpo del risonatore, l'energia nella direzione

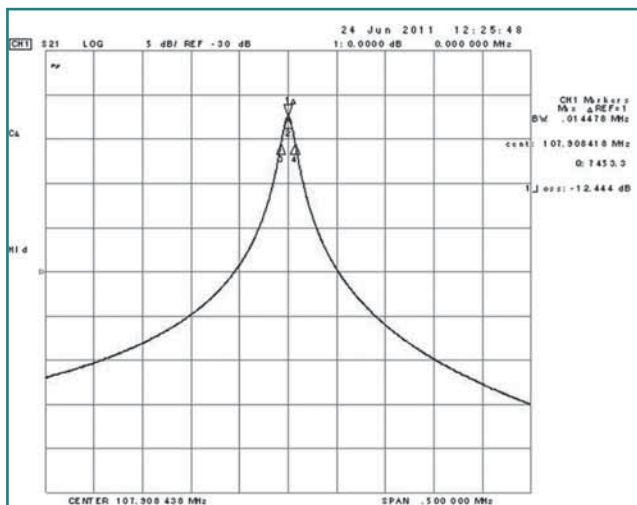


Fig. 2 - Diagramma S21 di un tipico risonatore pMEMS

della lunghezza desiderata può essere ottimizzata mediante un opportuno dimensionamento dello spessore e della larghezza del risonatore tali da minimizzare le perdite dalle altre direzioni. La figura 2 mostra un tipico risonatore a 107 MHz con un valore del fattore di qualità (Q) misurato di 7453 e una perdita di inserzione (insertion loss, IL) di -12,4 dB. I risonatori pMEMS sono fabbricati tramite un processo CMOS compatibile con packaging di tipo WLP (wafer

level packaging). Il processo di fabbricazione inizia con un wafer SOI (Silicon-on-Insulator) su cui vengono depositi i materiali piezoelettrici e gli elettrodi. Una volta che gli elettrodi sono stati disegnati, il corpo del risonatore è definito dalla sagomatura dello strato piezoelettrico e dal SCS. Successivamente un wafer di copertura (cap wafer) viene collegato (bonded) al wafer del dispositivo, mentre uno strato con i pad metallici viene depositato per sigillare ermeticamente il dispositivo. La figura 3 riporta la vista tridimensionale di un risonatore di dimensioni pari a $550 \times 450 \times 200 \mu\text{m}^3$ di tipo WLP.

Per dare un'idea delle dimensioni, nella figura 4 viene mostrato un risonatore pMEMS di tipo WLP posto su un chicco di riso.

Questi risonatori pMEMS sono collegati al die (IC die) mediante wire bonding per formare un oscillatore. La sezione di un oscillatore pMEMS in un package plastico è mostrata in figura 5.

Prestazioni dei dispositivi

Tra le altre limitazioni dei quarzi si possono segnalare anomalie di funzionamento (activity dips), invecchiamento, sensibilità alle vibrazioni e altri ancora.

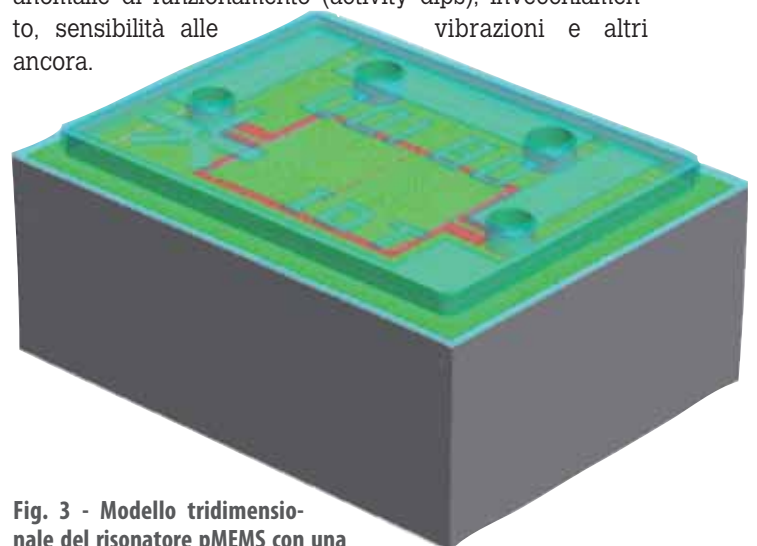


Fig. 3 - Modello tridimensionale del risonatore pMEMS con una microcapsula

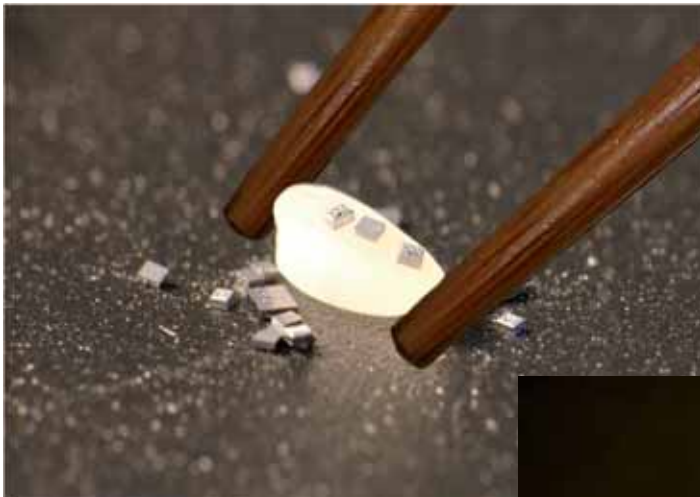


Fig. 4 - Risonatori pMEMS di tipo WLP posti su un grano di riso

Anomalie di funzionamento: una delle problematiche note degli oscillatori a cristallo sono gli activity dips che possono causare guasti intermittenti. Questi guasti colpiscono sia la frequenza che la resistenza (cioè il Q) dei risonatori a cristallo. Gli activity dips sono normalmente causati da modi interferenti (ad esempio da modi armonici superiori di flessione) e sono fortemente influenzati dal livello di pilotaggio del cristallo e dalla reattanza di carico. Tali anomalie di funzionamento non sono presenti negli oscillatori MEMS in quanto

essi sono progettati per sopprimere modi indesiderati in presenza di variazioni di temperatura e di processo che possono invece avere effetti negativi sugli oscillatori basati sui cristalli.

Sensibilità agli urti e alle vibrazioni: gli oscillatori MEMS garantiscono una maggiore resistenza agli urti e alle vibrazioni, qualità tipica dei semiconduttori. I dispositivi al

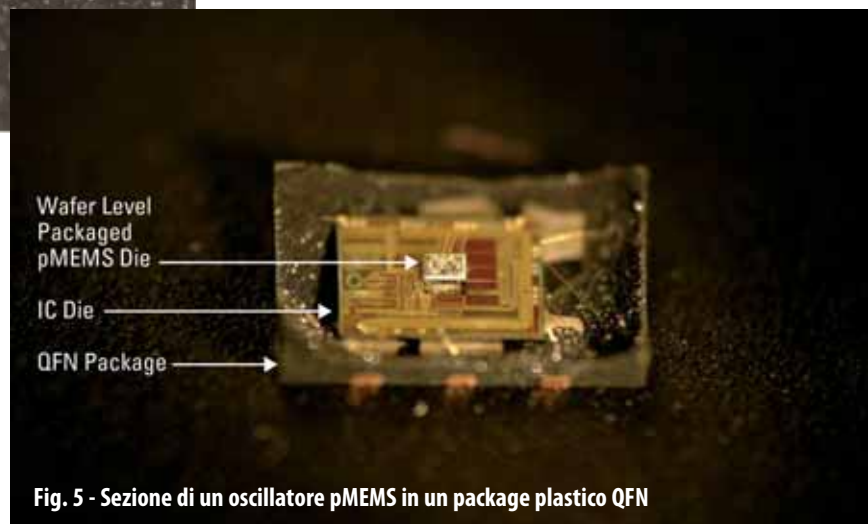


Fig. 5 - Sezione di un oscillatore pMEMS in un package plastico QFN

quarzo standard sono fragili in quanto il cristallo è alloggiato in un contenitore metallico o ceramico, ragion per cui il cristallo può venire frantumato da un urto di 50-100g. I produttori devono poi adottare specifici protocolli di immagazzinamento, imballaggio e spedizione per i dispositivi a cristallo per evitare il danno prodotto da una manipolazione poco attenta.



Le prove di resistenza agli urti e alle vibrazioni cui sono stati soggetti gli oscillatori pMEMS hanno dato i seguenti risultati: i dispositivi sono stati facilmente in grado di "sopravvivere" a scosse maggiori di 1500g e test vibrazionali di 20g come mostrato nella figura 6.

Le piccole dimensioni dei risonatori pMEMS si traducono in una migliore affidabilità: a una massa minore corrisponde a una migliore sensibilità alle vibrazioni/urti. Oltre a soddisfare le specifiche militari in termini di urti/vibrazioni, i dispositivi pMEMS

Vibration Tests Passed	
Conditions	A (MIL-STD-883, Method 2007)
Acceleration	20 G
Min / Max Frequency	20 / 2000 Hz
Number of Sweeps	4 (4 min each) For Each Direction
Direction	X, Y, Z (Total 12 Sweeps)
Mechanical Shock Tests Passed	
Conditions	B (MIL-STD-883, Method 2002)
Acceleration	1500 G
Pulse Duration	0.5 msec
Number of Shocks	5 for each axis, total 30
Drop Direction	X1, X2, Y1, Y2, Z1 and Z2
Constant Acceleration Tests Passed	
Conditions	E (MIL-STD-883, Method 2001.3)
Stress Level	30,000 G
Stress Time	1 Minute
Radius of Rotation	4.125 inch
Rotation Speed for Required Condition	16,006 RPM
Direction	Y1

Fig. 6 - I dispositivi pMEMS hanno superato positivamente i test alle vibrazioni e agli urti previsti dalle specifiche militari

rimangono operativi dopo test di urti da 70000g. Stabilità della frequenza: la stabilità a lungo termine della frequenza è stata anche misurata sottoponendo questi dispositivi pMEMS ospitati in contenitori plastici QFN a test di invecchiamento a lungo termine (cioè di deriva della frequenza). In questi test i risonatori pMEMS in package plastici sono stati messi insieme ai dispositivi al quarzo in camere a temperatura controllata. A 25 °C i dispositivi pMEMS hanno una variazione della frequenza minore di ± 2.5 ppm durante un periodo di 21 mesi, che è migliore della tipica prestazione dei quarzi, che si attesta a ± 5 ppm (Fig. 7).

In aggiunta, quando collaudati a 125 °C, i dispositivi pMEMS mostrano meno di ± 3 ppm di deriva della frequenza per 4500 ore, che è significativamente meglio delle tipiche misure dei quarzi di ± 10 ppm (Fig. 8).

Campi di applicazione

Infine, per dimostrare le prestazioni nel mondo reale di questi oscillatori pMEMS caratterizzati da un jitter inferiore al ps (12 kHz – 20 MHz), sono state realizzate tre applicazioni campione nel campo delle reti, delle FPGA e della memorizzazione, come illustrato in figura 9.

Altri vantaggi dei prodotti basati sui MEMS

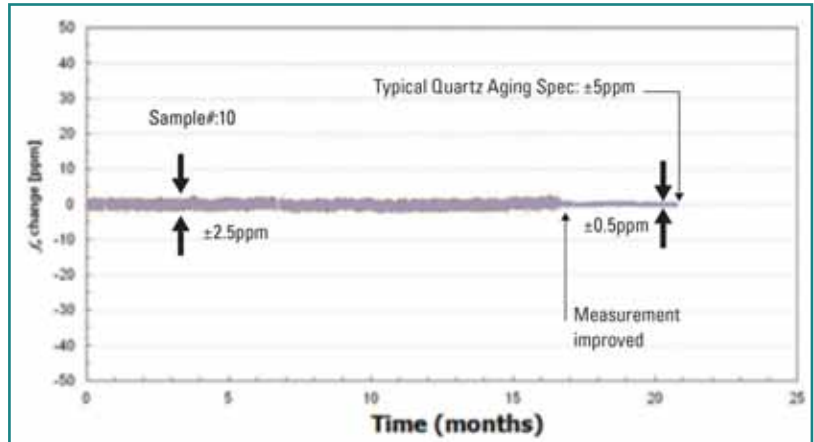


Fig. 7 - Misure di invecchiamento di 10 risonatori pMEMS durante 21 mesi a 25°C

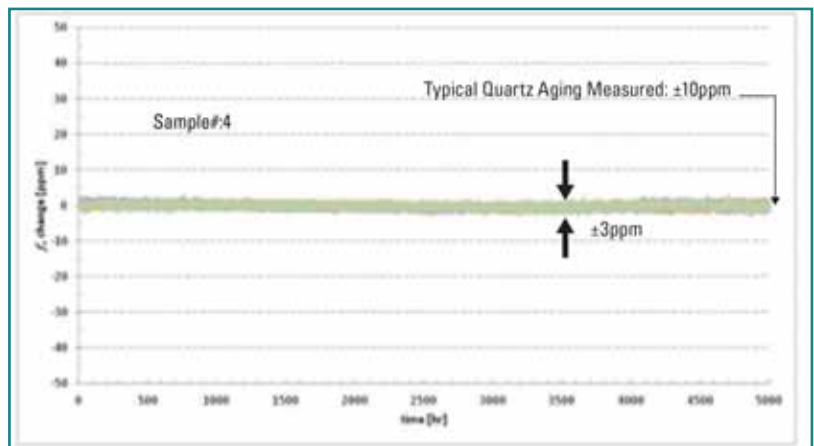




Fig. 8 - Misure di accelerazione di 10 risonatori pMEMS per 4500 ore a 125°C (accuratezza della misura ± 2 ppm)

Networking Application:
SRIO PCIe Bridge (4x5Gbps)
 MEMS Oscillator:
 156.250 MHz, LVPECL, 7050 Package



FPGA Application:
Xilinx Virtex 6
 MEMS Oscillator:
 200.000 MHz, LVDS, 5032 Package



Storage Application:
SAS Controller for SSD
 MEMS Oscillator:
 150.000 MHz, LVPECL, 7050 Package

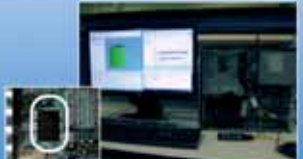


Fig. 9 - Impiego degli oscillatori pMEMS dimostrato in tre diverse applicazioni

includono una compatibilità intrinseca con i processi di assemblaggio a montaggio superficiale e tempi di sviluppo ridotti. Ciò permette ai fornitori e agli utilizzatori di conservare un magazzino di componenti più piccolo mantenendo un ridotto rischio di esaurire le scorte. Gli oscillatori MEMS di IDT supportano uscite tipo LVDS (low-voltage differential signaling) e LVPECL (low-voltage positive emitter-coupled logic) fino a 625 MHz, che è la frequenza richiesta nella maggior parte delle applicazioni di comunicazione, reti e calcolo ad alte prestazioni. ■