POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

ANALISI TEORICA E SPERIMENTALE DELL'ACCOPPIAMENTO ELETTRO-TERMO-MECCANICO DEI MICROINTERRUTTORI

Original
ANALISI TEORICA E SPERIMENTALE DELL'ACCOPPIAMENTO ELETTRO-TERMO-MECCANICO DEI MICROINTERRUTTORI / Brusa, E., DE PASQUALE, G., Soma', A.. - ELETTRONICO. - (2011), pp. 1-10. (40° Convegno dell'Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) Palermo 7-10 Settembre, 2011).

Availability:
This version is available at: 11583/2439575 since:

Publisher:

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

29 November 2026

AIAS – ASSOCIAZIONE ITALIANA PER L'ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI
40° CONVEGNO NAZIONALE, 7-10 SETTEMBRE 2011, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

AIAS 2011 - 131

ANALISI TEORICA E SPERIMENTALE DELL'ACCOPPIAMENTO ELETTRO-TERMO-MECCANICO DEI MICROINTERRUTTORI

E. Brusa, G. De Pasquale, A. Somà

Politecnico di Torino – Dipartimento di Meccanica,
Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino, e-mail: eugenio.brusa@polito.it,
giorgio.depasquale@polito.it, aurelio.soma@polito.it

Sommario
I microinterruttori costituiscono un caso emblematico di progettazione di strutture soggette ad accoppiamento elettro-termo-meccanico. L'interazione tra la forza esercitata dal campo elettrico per attuare il microsistema e la risposta meccanica della struttura è, infatti, fortemente influenzata da nonlinearità di tipo geometrico ed elettromeccanico, dalla temperatura di esercizio indotta anche dall'effetto Joule, dalle tensioni residue conseguenti il processo di microfabbricazione, nonché dagli effetti dell'instabilità elastica. In letteratura non appaiono ancora chiare indicazioni sugli esiti della sovrapposizione di tali effetti. Il lavoro ripercorre, quindi, per mezzo di strumenti analitici, numerici e sperimentali una tipica sequenza delle operazioni svolte dal dispositivo per caratterizzare i vari accoppiamenti che vi si sviluppano e predire l'affidabilità del microsistema.

Abstract
Microswitch device looks a typical case of design of structure affected by the electro-thermo-mechanical coupling. Interaction between the force applied by the electric field to operate the microsystem and its mechanical behaviour is strongly affected by geometrical and electromechanical nonlinearities. In addition temperature rises up during the device operation, even because of the Joule effect. Sometimes residual stresses due to the microfabrication process are present. Buckling phenomenon may evenly occur. In the literature clear statements about the effects caused by the superposition of those phenomena are not yet available. This paper investigates a typical sequence of operations performed by the microdevice, by means of analytical, numerical and experimental approaches aimed at identifying the coupling effects occurring into the MEMS and to predict its reliability.

Parole chiave: Meccatronica strutturale, accoppiamento termomeccanico ed elettromeccanico, metodo degli elementi finiti, microsistemi elettromeccanici (MEMS), instabilità elastica.

1. INTRODUZIONE

I microinterruttori elettromeccanici per applicazioni in radio frequenza, nel seguito indicati brevemente come RF-MEMS, sono caratterizzati dalla molteplicità di accoppiamenti tra domini fisici differenti che si sovrappongono nelle varie fasi del loro impiego [1-3]. La struttura consiste di una trave incastrata alle cosiddette ancore, che vengono realizzate sul piano del wafer per sospenderla rispetto ad un elettrodo fisso, depositato sul circuito, nei confronti del quale essa si comporta come armatura deformabile di un condensatore piano (Fig.1). Oltre all'usura del contatto elettrico e ai cedimenti di natura elettrica, usualmente i cedimenti strutturali del microinterruttore avvengono per plasticizzazione del materiale, rottura statica o a fatica [4,5]. Non mancano, tuttavia, casi di

danneggiamenti indotti dalla temperatura e dall'instabilità elastica, non sempre previsti né correttamente monitorati nel corso delle prove sperimentali effettuate dai vari autori [6-9].

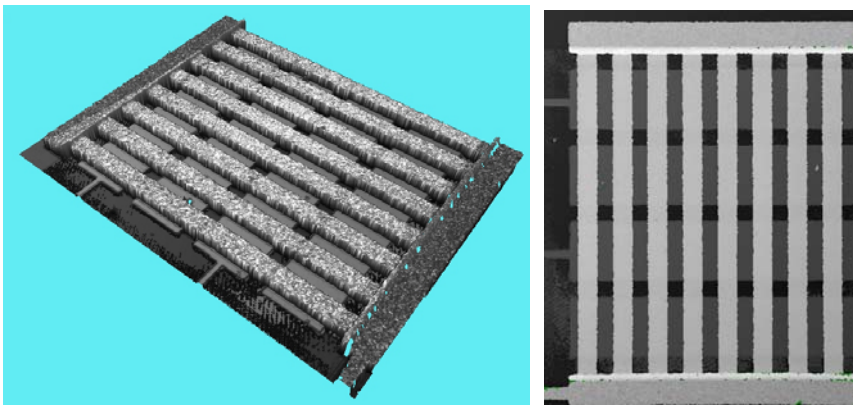


Figura 1: Ricostruzione tridimensionale e immagine in pianta di un set di microinterruttori come risultano al profilometro Zoom Surf 3D Fogale®.

Questa varietà di modi di danneggiamento motiva l'estensiva caratterizzazione sperimentale effettuata tanto sui materiali che sui microsistemi, al termine del processo di microfabbricazione [10,11]. Durante tali prove si rilevano, inoltre, i due valori di tensione elettrica fondamentali per il funzionamento dell'RF-MEMS, corrispondenti rispettivamente al "pull-in" e al "pull-out" del microsistema [1]. Il primo identifica il repentino scatto della struttura verso il piano del wafer, nonché la chiusura del contatto con l'elettrodo, a seguito del prevalere della forza elettromeccanica sul richiamo elastico della microtrave. Il secondo, invece, permette di quantificare la forza elettrica necessaria a vincere le tipiche azioni elettriche di medio e corto raggio che si registrano anche dopo la disattivazione del campo elettrico e a distaccare la microtrave dall'elettrodo. Ai fini del progetto è essenziale tanto l'affidabilità della microstruttura quanto la funzionalità del microinterruttore che deve operare la chiusura e l'apertura del circuito con le tempistiche stabilite senza innescare indesiderati ritardi [4]. A quanto risulta in letteratura una chiara interpretazione della dipendenza dei valori delle tensioni di "pull-in" e di "pull-out" dal riscaldamento del microinterruttore e del suo eventuale collasso per instabilità dell'equilibrio elastico non è stata ancora fornita. Pertanto i criteri finora espressi per la progettazione di questi microdispositivi appaiono non del tutto esaurienti. In questo lavoro si è perseguito l'obiettivo di colmare questa lacuna, studiando il caso concreto di RF-MEMS di dimensioni e configurazioni tipiche della produzione commerciale, per comprendere cosa accada nelle varie fasi dell'attuazione. In particolare sono stati considerati gli effetti delle tensioni residue dovute al processo di microfabbricazione [12,13], l'eventuale instabilità dell'equilibrio elastico [6,14] e la variazione di temperatura tanto ambientale che conseguente al riscaldamento per effetto Joule [15]. Lo studio è stato effettuato tramite modelli analitici, per mezzo del metodo degli elementi finiti e per via sperimentale, per mezzo del profilometro Zoom Surf Fogale 3D, secondo l'approccio esposto in [3].

2. ANALISI DEL FUNZIONAMENTO DEL MICROINTERRUTTORE

In letteratura l'accoppiamento elettromeccanico presente nel microinterruttore è stato il principale oggetto di indagine sia per quanto riguarda il comportamento statico che dinamico, specie negli aspetti più tipicamente nonlineari, ma solo recentemente si è incominciato a tenere conto della temperatura, delle tensioni residue iniziali e di fenomeni di instabilità per carichi di compressione, per lo più in modo distinto, senza badare troppo alla loro mutua interazione [6,7,9,15]. I risultati presentati appaiono pertanto parziali e discordanti, anche a parità di aspetto indagato. Per superare tale difficoltà l'indagine qui proposta è di tipo fenomenologico, ovvero analizza in sequenza le condizioni di attuazione che il microinterruttore subisce nel corso del suo esercizio per studiare le varie forme di accoppiamento che si instaurano e come esse interagiscano tra loro. Lo studio è stato svolto in due fasi: dapprima la sequenza delle operazioni in esercizio è stata predetta dai modelli analitici e numerici implementati, poi l'attività sperimentale ha condotto alla conferma delle conclusioni. In Fig.2 sono,

pertanto, rappresentate le tipiche fasi dell'esercizio del microinterruttore, così come il modello elettro-termo-meccanico sviluppato con il metodo degli elementi finiti ha predetto [16]. Sono l'esito di una soluzione nonlineare sia geometrica che elettromeccanica, associata ad un'analisi sequenziale a domini fisici accoppiati, nella quale si è fatto uso di 160 elementi strutturali di tipo 'shell' per la descrizione del comportamento della microtrave e di 40 elementi di transizione elettrostatici, disponibili nel codice ANSYS©, per il dielettrico. Questi ultimi caratterizzano la forza di attuazione elettrostatica per mezzo di un modello a parametri concentrati, che permette di non discretizzare il volume d'aria entro cui agisce il campo elettrico, evitando problemi di distorsione degli elementi, tipici di casi in cui trave ed elettrodo sono così vicini [2].

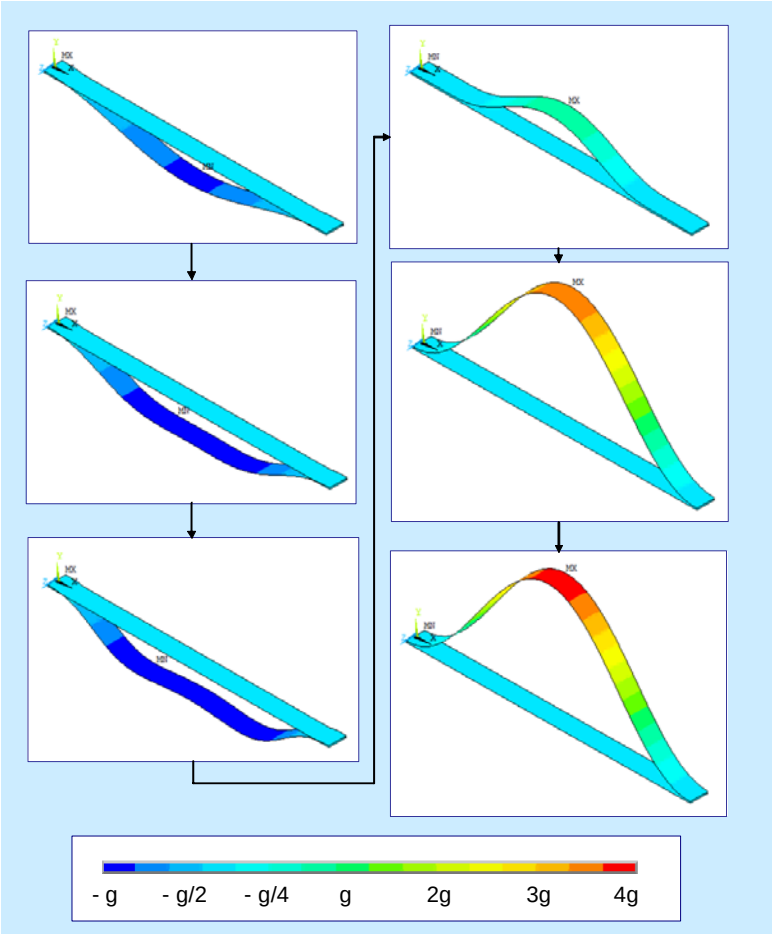


Figura 2: Ricostruzione numerica del funzionamento del microinterruttore, con indicazione dello spostamento verticale normalizzato al valore nominale *g* della luce tra struttura e controelettrodo.

Nel riquadro superiore sinistro di Fig.2 si ipotizza che la microtrave non sia soggetta al carico elettrostatico. Essa dovrebbe apparire indeformata. In realtà, la temperatura può superare quella per la quale è stato microfabbricata, cosicché è possibile che la dilatazione termica induca un modesto effetto di inflessione. In letteratura non appare chiaro *se tale deformazione sia rivolta verso il controelettrodo* [6] *o in verso opposto* [8]. Il processo di microfabbricazione dovrebbe inoltre fornire il sistema senza effetti di curvatura né di tensione residua. Nel caso di interruttori in oro, purtroppo, una modesta contaminazione del materiale da parte del cromo presente nel materiale sacrificale comporta, nella configurazione incastrata agli estremi, uno stato di tensione residuo trattivo [12]. Il valore della tensione di "pull-in" risulta così innalzato per via dell'accoppiamento assiale-flessionale. I due effetti sono potenzialmente in contrasto. Da un lato la tensione residua trattiva comporta un apparente irrigidimento della microtrave, al quale si può contrapporre l'azione compressiva causata dalla dilatazione termica. Il carico assiale di compressione riduce la forza necessaria al "pull-in", diminuisce il carico critico per instabilità dell'equilibrio elastico sulla trave e riduce anche la frequenza propria del modo di vibrazione flessionale. In letteratura spesso tale effetto *non è considerato* [6], oppure si

assume che *esista solo una forza assiale costante* [7], che non include l'accoppiamento assiale-flessionale che i modelli numerici possono valutare seguendo una soluzione nonlineare [2]. Nei dispositivi commerciali tale effetto esiste, ancorché non ne sia nota a priori l'intensità. In Fig.2, si è supposto inizialmente che, per effetto di un modesto incremento della temperatura ambientale, la microtrave esibisca una moderata flessione verso il controelettrodo, pur senza entrare in contatto con questo, favorendo così il "pull-in", mentre il caso di allontanamento è stato esaminato al termine della sequenza, come sarà specificato meglio nel seguito. A "pull-in" raggiunto, la tensione elettrica è mantenuta fissa, almeno temporaneamente, per garantire la chiusura del contatto e il passaggio di corrente. Ne consegue un aumento della temperatura per effetto Joule [14,15]. Si noti che nel corso dell'attuazione dinamica ad elevata frequenza il tempo disponibile per ogni contatto e per una rapida conduzione del calore attraverso la sezione della microtrave è molto breve. Tuttavia la frequenza elevata, dell'ordine dei kHz fino a pochi MHz, fa sì che il riscaldamento sia percepito quasi come fosse continuativo, in quanto la quantità di calore assorbita non è rilasciata nell'altrettanto breve fase di apertura del contatto [15]. L'incremento di temperatura induce una dilatazione tale che si crea un'azione di compressione crescente, che aumenta la superficie di contatto della microtrave sull'elettrodo fisso, sul quale essa si adagia, come si apprezza nel riquadro sinistro inferiore di Fig.2. L'aumento della superficie di contatto favorisce le forze di attrazione di medio e corto raggio, cosicchè taluni autori indicano che *la tensione di "pull-out" è sicuramente accresciuta* [8]. Esistono *testimonianze di "pull-out" improvviso e spontaneo*, apparentemente inspiegabile [6], che porterebbe, ad un improvviso rilascio della microtrave e ad una veloce flessione in direzione opposta, così come descrivono i riquadri della colonna destra di Fig.2, dall'alto verso il basso. La distanza assunta dalla sezione centrale può essere pari a 3 o 4 volte la luce inizialmente esistente tra struttura ed elettrodo. A seconda dei casi [6-10], ne segue che la microtrave *si rompe*, così velocemente da non rendere visibile l'evoluzione tra la condizione di contatto e quella finale descritta in Fig.2, oppure che il "pull-out" così violento *non permette un successivo "pull-in" della struttura così deformata*. Si consideri che in tutta questa rapida successione la tensione elettrica non è disattivata, in quanto il "pull-out" spontaneo non è previsto a priori. Infine, la configurazione deformata del riquadro destro inferiore di Fig.2 potrebbe anche essere ottenuta quando la struttura non è ancora attuata, se la temperatura cresce in misura consistente e la microtrave si deforma spontaneamente in tale direzione [3]. In tal senso questo corrisponde al caso lasciato in sospeso, di deformata antagonista in assenza di attuazione elettrica.
In sintesi lo scopo dello studio è quello di chiarire sotto quali condizioni l'incremento di temperatura comporti rispettivamente un aumento o un decremento dei valori di tensione di "pull-in" e di "pull-out", tenuti in conto anche gli effetti delle tensioni residue e dell'instabilità elastica, nonché di motivare mancati "pull-in", spontanei "pull-out" e impreviste rotture dei microinterruttori.

3. INDAGINE PRELIMINARE

L'analisi si è basata inizialmente sui risultati numerici ottenuti per una tipica configurazione di RF-MEMS, prodotta dalla Fondazione Bruno Kessler (FBK) per una campagna di prove sperimentali. Essa appare come in Fig.3.

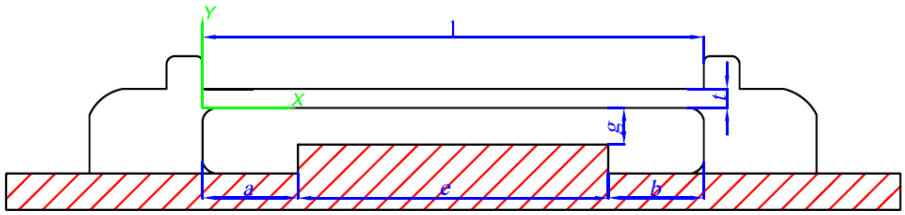


Figura 3: Configurazione del microinterruttore oggetto di indagine

Le dimensioni nominali dell'RF-MEMS risultano $l = 540$ μm (lunghezza), $w = 34$ μm (larghezza), $t = 3$ μm (spessore) e g = 2.9 μm (luce o "gap"). Il materiale di microfabbricazione è oro, con modulo di Young, $E = 98.5$ GPa, densità, $\rho = 19.32\ \ 10^{-15}$ kg/μm^3, coefficiente di Poisson, $v = 0.42$ e coefficiente di dilatazione termica, $\alpha = 14.3\ \ 10^{-6}$ C^{-1}. Tali proprietà sono state certificate dal microfabbricatore, anche se sono risultate verificate nei loro valori, secondo le procedure di prova

messe a punto dagli autori in [1-3,12]. Il modulo di Young del materiale, nell'intervallo di esercizio compreso tra la temperatura ambiente e 70/120°C, esibisce una lineare riduzione del valore fino al 2% di quello misurato a temperatura ambiente, secondo l'unico riferimento sperimentale reperito [17].
Un primo aspetto esaminato riguarda *la direzione di inflessione spontanea della microtrave per effetto di un aumento della temperatura*. In produzione si registra una tendenza dell'RF-MEMS a deformarsi in direzione antagonista rispetto a quella di attuazione [3,15]. Tuttavia, alcune simulazioni hanno dimostrato che, benché il profilo delle ancore nella sezione di incastro si presenti leggermente differente in quanto a inerzia alla rotazione, a seconda che il carico induca una deformazione verso l'elettrodo o in direzione contraria, la differenza percentuale a parità di carico applicato sugli spostamenti rilevati è di qualche punto percentuale, a parità di geometria. Cosicché si può supporre che questo aspetto possa concorrere con altri a indurre una deformazione preferenziale, senza motivarla a priori. Più significativi sono *gli effetti della tensione residua indotta dal processo di microfabbricazione*. Purtroppo appare impraticabile una puntuale determinazione sperimentale del profilo delle tensioni residue all'interno dell'esiguo spessore del microinterruttore, mentre è rilevabile quanto meno il valore medio della tensione [13]. E', peraltro, verosimile che esista un modestissimo gradiente di tensione nella direzione dello spessore che favorisca l'inflessione in una data direzione, il cui effetto è misurabile solo a posteriori [18]. La determinazione della tensione residua media può seguire tre approcci. Una misura diretta della tensione di "pull-in" può essere confrontata con i valori deducibili da calcoli [1]. Si può condurre una prova dinamica di caratterizzazione della prima frequenza propria di vibrazione flessionale [2], oppure si può utilizzare proprio una prova di dilatazione termica, come descritto in [3]. Il modello analitico di correlazione tra la temperatura che induce l'instabilità elastica della microtrave caricata a compressione può, infatti, includere il termine dovuto alla trazione media esercitata dalla tensione residua trattiva, σ_0, nella forma:

$$T^* = T_0 + \frac{\sigma_0}{E\alpha} + \frac{1}{3\alpha}\left(\frac{\pi\, h}{L}\right)^2 = T_0 + \Delta T_{\sigma 0} + \Delta T_{soglia} \tag{1}$$

dove i simboli hanno rispettivamente i significati di: lunghezza della microtrave, L, modulo di Young, E, momento di area del secondo ordine, trasversale e minimo della sezione della struttura, I, temperatura di riferimento, T_0, temperatura per il raggiungimento della soglia di instabilità elastica, T^*, e area della sezione trasversale, A. Il comportamento in regime di 'post-buckling' è coerentemente calcolabile con l'espressione:

$$T(a) = T^* + \frac{\pi^2 a^2}{4\alpha L^2} = T^* + \Delta T_{post}(a) \tag{2}$$

dove a è proporzionale all'ampiezza dello spostamento verticale della sezione di mezzeria [3]. Le due equazioni evidenziano i vari contributi che portano dalla temperatura T_0 alla soglia di instabilità, T^*, quindi al comportamento in 'post-buckling'. La curva sperimentale evidenzia un brusco cambiamento di tendenza per la natura parabolica del tratto in regime di 'post buckling' che rende immediata la lettura della T^*.
A titolo di esempio, seguendo il caso illustrato in Fig.2, il modello FEM individua una tensione di "pull-in" iniziale di 35 V per il microinterruttore privo di effetti di tensione residua e di temperatura. Il valore raddoppia se la tensione residua iniziale è 30 MPa. Così pure la temperatura di soglia per l'instabilità, nel caso di puro riscaldamento del microinterruttore, è 30°C, ma diviene 54°C nel caso della tensione residua di 30 MPa. Tali valori di temperatura sono ampiamente all'interno degli intervalli di esercizio dell'RF-MEMS. Inoltre, in assenza della tensione residua, se la microtrave si deforma verso il controelettrodo per una temperatura di 33°C si registra un sensibile abbassamento del "pull-in" a 15 V, ma se si deforma verso l'alto per una temperatura di 40°C la tensione di "pull-in" passa a 40 V. Il gap è, infatti, ancora modesto ed esiste un buon bilanciamento tra l'elongazione dovuta all'effetto termico e l'irrigidimento dovuto alla tensione residua. Quando il gap risulta eccessivo, però, il campo d'azione della forza elettrostatica è insufficiente per riportare la struttura a contatto con l'elettrodo fisso. Questo è il caso che si verifica se per il riscaldamento indotto

dall'effetto Joule nella posizione di chiusura del contatto raggiunge i 90°C e si innesca l'instabilità secondaria della struttura. Il rapido scatto verso la configurazione antagonista è associato ad un'elongazione della microtrave tale che il gap arriva a quattro volte quello originale e la forza elettromeccanica di richiamo diventa insufficiente per un nuovo "pull-in". In sintesi, seguendo l'iter di Fig.2, l'aumento di temperatura, inducendo la struttura a deformarsi verso il "pull-in", aiuta significativamente l'azione elettromeccanica. Il contatto è inizialmente favorito dall'incremento della temperatura e il "pull-out" è ostacolato. Poi, se si supera la soglia di instabilità elastica secondaria, la microtrave subisce il "pull-out" spontaneo e può risultare deformata al punto da non poter procedere più al "pull-in". Se si procede ad un'analisi delle tensioni che si sviluppano nella microtrave, per la configurazione finale, in basso a destra di Fig.2, effettivamente si osservano valori che di poco eccedono il limite dei 120 MPa di rottura statica dell'oro, rilevato in prove in microscala [11]. Ciò può giustificare, pertanto, che taluni autori dichiarino la rottura improvvisa dell'RF-MEMS a seguito del "pull-out" spontaneo [6], anche se i valori di tensione calcolati non sono facilmente verificabili in prove sperimentali dirette e come tali sono considerati puramente indicativi.

4. INDAGINE SPERIMENTALE

L'attività sperimentale è stata condotta su alcuni prototipi di RF-MEMS, dei quali si riportano le caratteristiche in Tabella 1.

Tabella 1: Proprietà geometriche dei microinterruttori utilizzati nelle prove sperimentali

	Campione	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Lunghezza	[μm]	549.9 ±.3	547.7 ±.3	544.9 ±.3	547.6 ±.3	545.9 ±.3	547.9 ±.3	546.8 ±.3	546.3 ±.3
Larghezza	[μm]	32.8 ±.3	32.1 ±.3	33.0 ±.3	31.3 ±.3	32.2 ±.3	32.1 ±.3	32.5 ±.3	32.3 ±.3
Spessore	[μm]	2.839 $\pm.5\cdot10^{-4}$	2.784 $\pm.5\cdot10^{-4}$	2.840 $\pm.5\cdot10^{-4}$	2.896 $\pm.5\cdot10^{-4}$	2.836 $\pm.5\cdot10^{-4}$	2.875 $\pm.5\cdot10^{-4}$	2.815 $\pm.5\cdot10^{-4}$	2.864 $\pm.5\cdot10^{-4}$
Gap	[μm]	3.011 $\pm.5\cdot10^{-4}$	3.068 $\pm.5\cdot10^{-4}$	3.191 $\pm.5\cdot10^{-4}$	3.084 $\pm.5\cdot10^{-4}$	3.074 $\pm.5\cdot10^{-4}$	3.022 $\pm.5\cdot10^{-4}$	3.075 $\pm.5\cdot10^{-4}$	3.021 $\pm.5\cdot10^{-4}$

Essi sono stati microfabbricati dalla Fondazione Bruno Kessler di Trento (FBK) in oro, che esibisce le proprietà sopra descritte e certificate dal produttore. Il controelettrodo ha larghezza nominale corrispondente a quella del microinterruttore, mentre la sua lunghezza è pari a $101.1\pm0.5\cdot10^{-4}$ μm. Come si può notare le dimensioni sono prossime a quelle utilizzate nell'indagine numerica precedente, ancorché i valori puntuali differiscano per via del processo di microfabbricazione. I dati sono indicati a meno della risoluzione del profilometro Zoom Surf 3D della Fogale, che permette di attuare il microdispositivo, sia in condizioni di comportamento statico che dinamico [1,2,3,11].

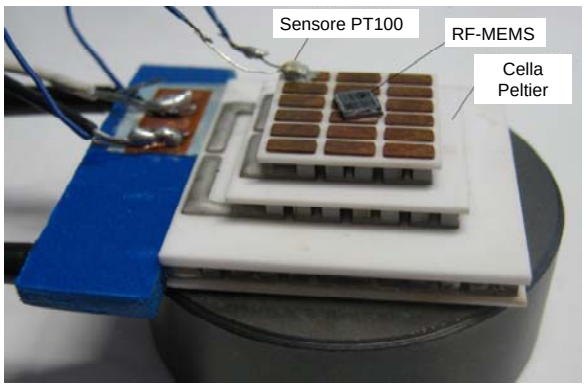


Figura 4: Allestimento sperimentale con wafer disposto su cella Peltier

La temperatura ambientale è stata condizionata tramite una cella Peltier, dotata di sensore PT100. Il profilometro opera su una finestra di lavoro minima di 100×100 μm^2 e fino ad una di 2×2 mm^2 con un

fattore di amplificazione massimo di 20x, con una risoluzione di ±0.3 μm, nel piano del wafer e di ± $0.5 \cdot 10^{-4}$ μm lungo l'asse focale. Misura uno spostamento massimo di 400 μm, attua fino a 200 V per una frequenza di eccitazione dinamica massima di 2 MHz. La cella Peltier assicura, invece, una risoluzione di ± 0.1 °C.

Per caratterizzare il comportamento elettro-termo-meccanico dei microinterruttori, sono state condotte prove sperimentali di attuazione sequenziale per misurare la curva caratteristica di flessione in presenza di diverse condizioni di temperatura e con carico elettrostatico variabile. I risultati sperimentali sono stati organizzati in due figure.

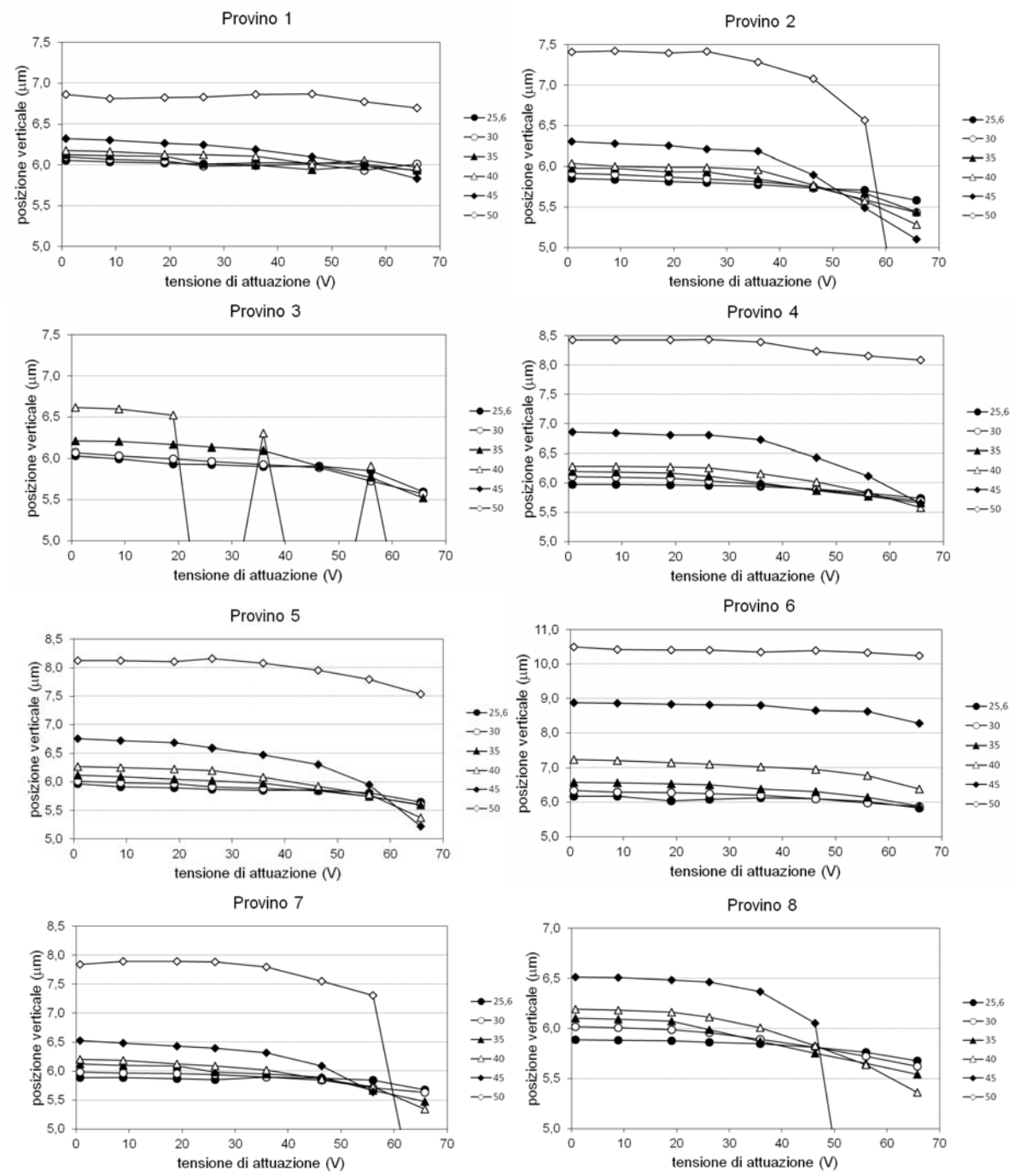
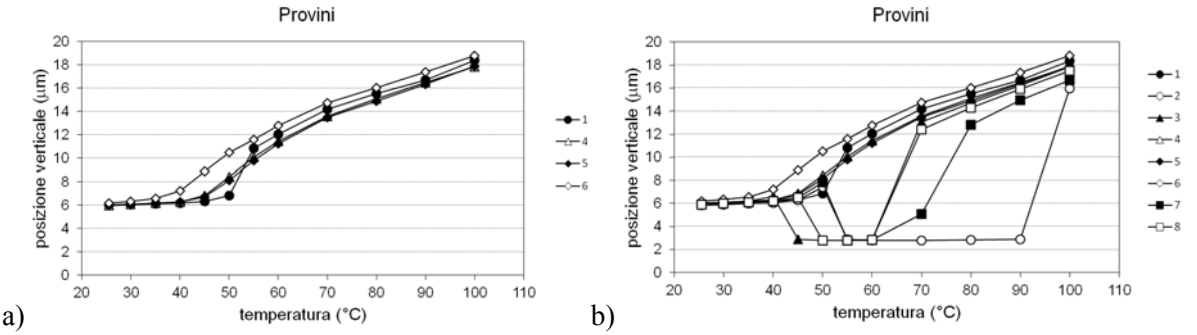


Figura 5: Curve di "pull-in" al variare della temperatura.

In Fig.5 sono state tracciate le curve di "pull-in" al variare della temperatura imposta tramite la cella Peltier, mentre in Fig.6 si rappresenta il comportamento termomeccanico del microinterruttore, in assenza di attuazione elettromeccanica. Le misure riportate si riferiscono alla posizione della sezione

di mezzeria del microinterruttore, per ogni condizione di carico. Si riportano nelle Figg.5 e 6 i risultati per gli otto prototipi analizzati. Pur avendo dimensioni nominalmente uguali, essi differiscono per i dettagli imposti dal processo di microfabbricazione. I risultati, riportati in Fig.5 per ogni provino, mostrano il comportamento flessionale statico per diverse combinazioni di carichi agenti sulla struttura. La sequenza di attuazione simula quella reale e si accosta a quella descritta dal modello numerico in Fig.2. Ogni microinterruttore è inizialmente attuato a temperatura ambiente fino alla tensione di 65 V, indicati dal progettista come la tensione di alimentazione circuitale massima a progetto. Essa è maggiore della tensione di "pull-in" prevista, anche nel caso di una modesta tensione residua iniziale trattiva, che è tollerata. Indicativamente ogni microinterruttore dovrebbe raggiungere il "pull-in" e fornire il contatto. In caso contrario si presume che i difetti di fabbricazione, la morfologia della microtrave e delle ancore e la tensione residua giochino un ruolo preponderante. Il microinterruttore è poi riportato ad attuazione nulla mentre viene incrementata la temperatura e successivamente riportato in tensione. Tale caratterizzazione procede sequenzialmente fino alla temperatura di 100°C, intesa dal produttore come limite operativo, almeno per questa configurazione.



a) b)

Figura 6: Risposta termo-meccanica dei microinterruttori oggetto di indagine; provini non soggetti a "pull-in" (a) e provini soggetti a "pull-in".

Dall'osservazione di Fig.5 si può notare come i microcampioni 1,4,5 e 6 non raggiungano la condizione di "pull-in" nell'intervallo dei valori di attuazione elettrica considerato, cosicché anche nelle curve di Fig.6 essi esibiscono una crescente deformazione verso l'alto, all'aumentare della temperatura. I campioni 2, 3, 7 e 8, invece, raggiungono la condizione di "pull-in" e sono soggetti a deformazioni sia verso l'alto che verso il basso nella corrispondente curva di Fig.6.
In relazione alle istanze di questo studio, nelle curve di Fig.5 si noti come:

- la posizione iniziale dei diversi campioni, in assenza di attuazione e a temperatura ambiente, sia confrontabile, ma non sovrapposta, a causa delle modeste ma significative differenze tra le strutture;
- tutte le strutture all'aumentare della temperatura tendano a deformarsi verso l'alto;
- la deformazione sia orientata verso l'elettrodo fisso, all'aumentare della temperatura fino a raggiungere la condizione di "pull-in" evidente nei provini 2,3,7 e 8.
- la tensione di "pull-in" tenda a diminuire al crescere della temperatura, a causa dell'effetto del carico compressivo.

In particolare, si ponga attenzione ad alcune evidenze manifeste nei singoli diagrammi. Il *provino 1* mostra un'insolita insensibilità all'attrazione elettrostatica, che si può percepire nel fatto che le curve sono pressoché sovrapposte, anche all'aumentare della temperatura, salvo subire un incremento significativo nel caso dei 50°C, spiegabile con il fatto che, come la Fig.6 evidenzia, esso passa ad operare in regime di 'post-buckling'. Due aspetti motivano tale comportamento. Da un lato il provino è posto alla periferia del set costruito (Fig.1) ed è più soggetto alle dispersioni del campo elettrico. Dall'altro, la curva in temperatura raffigurata in Fig.6a dimostra come la tensione residua presente, secondo quanto espresso dall'Eq.(1), sia la più alta fra tutti provini, in quanto la temperatura di soglia per l'instabilità elastica è posta proprio in prossimità dei 50°C. Com'è più evidente nel *provino 2*, a mano a mano che la temperatura cresce la sezione centrale del microinterruttore tende a scendere più facilmente, abbassando il valore della tensione di "pull-in" che a temperatura ambiente è al di fuori dell'intervallo di valori considerato in prova, mentre a 50°C si pone a 60 V. Il "pull-in" interviene quasi in concomitanza con il superamento della soglia di instabilità, come si percepisce in Fig.6b. In questo caso una volta che il "pull-in" è raggiunto l'innalzamento della temperatura dapprima favorisce

l'adesione al contro elettrodo e, poi, ai 90°C, così come il modello FEM aveva predetto, si innesca un "pull-out" spontaneo di natura puramente termica. La distanza dall'elettrodo è decisamente molto ampia. Il *provino 7* manifesta un comportamento molto prossimo a quello del 2. In fase di riscaldamento dopo il "pull-in", tuttavia, lo scatto verso la posizione antagonista avviene a temperatura inferiore. Tale differenza si percepisce già nella curva di "pull-in", in quanto la deformata indotta dall'incremento di temperatura è più accentuata, segno di una tensione residua iniziale più moderata. Il *provino 8* risulta più sensibile all'attuazione sia elettrica che termica, infatti il "pull-in" si innesca a soli 50 V, mentre il "pull-out" termico spontaneo si manifesta già a 60°C. Questo comportamento è simile a quello del *provino 3*, che però evidenzia un'anomalia marcata nella curva di "pull-in". Esso subisce, infatti, un primo "pull-in" a soli 22 V, a 40°C che fa sì che la microtrave rimanga adesa al controelettrodo fino a quando la tensione sale a 35 V, per poi collassare nuovamente e subire un ulteriore rilascio a 55 V, per poi andare in definitivo "pull-in" a 60 V. In questo caso la curva in temperatura evidenzia come il "pull-out" spontaneo sia molto precoce, già a 40°C. Tale comportamento si spiega anche con il fatto che all'aumentare della temperatura il provino 3 tende a inflettersi meno verso l'alto degli altri. Non solo, la curva di Fig.6b evidenzia come esso lavori già alla soglia del regime di 'post-buckling' a 40°C con il risultato che la curva di "pull-in" è conseguenza di una serie di scatti indotti dalla deformazione della struttura e delle ancore e dalla forza elettrostatica in graduale intensificazione. I *provini 4 e 5* esibiscono un comportamento molto simile. Le curve di "pull-in" evidenziano la presenza di una tensione residua iniziale che non permette al microinterruttore di arrivare al contatto con il contro elettrodo nell'intervallo di prova. Conferma di tale deduzione è data dalla curva in temperatura, dove si apprezza che la temperatura di soglia per l'instabilità elastica è prossima ai 45°C. Il modello descritto in Eq.(1) suggerisce che tale condizione è compatibile con una tensione residua di 25 MPa, leggermente inferiore a quella del provino 1, valutabile in circa 30 MPa. Il *provino 6*, infine, nella curva in temperatura evidenzia una transizione al regime di 'post-buckling' già a 40°C circa, indice di una sostanziale assenza di tensione residua trattiva. Nella curva di "pull-in", tuttavia, si osserva come la struttura tenda a deformarsi spiccatamente verso l'alto, raggiungendo la distanza massima dal controelettrodo tra tutte quelle registrate sui diversi provini, alla temperatura di 50°C, anche se poi essa è confrontabile con i valori raggiunti dagli altri provini a seguito del "pull-out" spontaneo. La conseguenza è che il provino non arriva al "pull-in". I due risultati appaiono in contraddizione, tuttavia si è rilevata una modesta deformazione delle ancore che induce un effetto di flessione tale da favorire un'ampia deformazione del microinterruttore verso l'alto e contrastare l'attrazione elettrostatica verso il "pull-in".

5. CONCLUSIONI

Una corretta interpretazione del comportamento in esercizio dei microinterruttori per radio frequenza appare possibile solo esaminando l'accoppiamento combinato elettro-termo-meccanico al quale è soggetto il microsistema. In particolare i dubbi espressi in letteratura in merito all'influenza del riscaldamento subito dal microdispositivo in esercizio sulle tensioni di "pull-in" e di "pull-out" che ne regolano rispettivamente la chiusura e l'apertura e il relativo passaggio di corrente possono essere risolti solo tenendo simultaneamente in conto l'attuazione elettrostatica, la tensione residua indotta dal processo di microfabbricazione, la dilatazione termica della struttura e il conseguente carico compressivo che essa induce per effetto dei vincoli. I risultati numerici e sperimentali dimostrano come i valori di "pull-in" e di "pull-out" siano l'esito di un effetto combinato principalmente delle tensione residua presente nel provino e dell'instaurarsi del fenomeno dell'instabilità dell'equilibrio elastico. Il raggiungimento del carico critico primario per l'instabilità per effetto dell'incremento della temperatura non solo può verificarsi negli intervalli di temperatura tipici per l'esercizio del componente, ma può essere indicativo per il rilevamento della tensione residua presente. L'innesco di un'instabilità secondaria può inoltre spiegare il fenomeno del "pull-out" spontaneo, nonché alcune impreviste rotture documentate nella letteratura. Si conferma, pertanto, come il valore della tensione di "pull-in" scenda all'aumentare della temperatura, in assenza di tensione residua, che, invece, tende ad incrementarlo. L'incremento di temperatura inizialmente favorisce l'adesione della struttura al controelettrodo, ma se diventa significativo può indurre l'instabilità elastica secondaria e motivare il "pull-out" spontaneo.

BIBLIOGRAFIA

[1] A.Ballestra, E.Brusa, M.Munteanu, A.Somà, "Caratterizzazione sperimentale di microattuatori elettrostatici trabeiformi per applicazioni in radio-frequenza", Atti del XXXVI Conv. Naz. AIAS, Ischia, Settembre 2007.

[2] A.Ballestra, E.Brusa, G.De Pasquale, M.Munteanu, A.Somà, "Modellazione e identificazione sperimentale del pull-in in presenza di stress residuo"; Atti del XXXVII Conv. Naz. AIAS, Roma, 9-11 Settembre 2008.

[3] E.Brusa, G.De Pasquale, A.Somà, "Caratterizzazione del comportamento termomeccanico di microsistemi"; Atti del XXXIX Cong. Naz. AIAS, Maratea, 8-10 settembre 2010.

[4] G.Rebeiz, *RF MEMS: Theory, Design, and Technology*, Wiley Interscience, New York, 2002.

[5] O.Tabata et al., *Reliability of MEMS: Testing of Materials and Devices*, Wiley-VCH, 2008.

[6] L.Lin et al., "Self-buckling of micromachined beams under resistive heating", *Trans. ASME/IEEE J.MEMS*, 9(1), 2000.

[7] Q.Jing, *Modeling and Simulation for Design of Suspended MEMS*, Ph.D. thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 2003.

[8] Y.Zhu et al., "Effect of temperature on capacitive RF MEMS switch performance a coupled-field analysis", *J.Micromechanics and Microengineering*, 14, 2004.

[9] O.Rezvanian et al., "The role of creep in the time-dependent resistance of Ohmic gold contacts in radio frequency microelectromechanical system devices", *J. Applied Physics*, 104(2), 2008.

[10] K.Sadek et al., "A coupled field multiphysics modeling approach to investigate RF-MEMS switch failure modes under various operational conditions", *Sensors*, 9, 2009.

[11] A.Somà et al., "MEMS mechanical fatigue: experimental results on gold microbeams", *J. MEMS Trans. ASME/IEEE*, 18, 2009, pp.828–835.

[12] A.Somà, G.De Pasquale, E.Brusa, A.Ballestra, "Effect of residual stress on the mechanical behaviour of microswicthes at pull-in threshold", *Strain*, 46 (4), 358–373, 2010.

[13] A.Somà, A.Ballestra, "Residual stress measurement method in MEMS microbeams using frequency shift data", *J.Micromechanics and Microengineering*, 19(9), 2009.

[14] H.Nieminen et al., "Design of a Temperature-Stable RF-MEMS Capacitor", *J.MEMS*, 13(5), 2004.

[15] C.L.Goldsmith et al., "Temperature Variation of Actuation Voltage in Capacitive MEMS Switches", *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, 15(10), 2005.

[16] E.Brusa, M. Gh. Munteanu, "Effect of electro-thermo-mechanical coupling on the short-circuit in RF microswitch operation", Proc. SPIE Microtechnologies 2011, 18-20 April 2011, Prague Czech Republic, Vol.8066, ISNN 0277-786X, ISBN 9780819486554.

[17] S.M.Collard, "High temperature elastic constants of Gold single-crystals", Ph.D. Thesis, Rice University, n.9136015, Houston, Texas, 1991.

[18] V.Mulloni et al., "Controlling stress and stress gradient during the release process in gold suspended micro-structures", *Sensors and Actuators A*, 162, 2010.