

## MICRO-COMUTATOARE RF MEMS: FIABILITATE, MODURI ȘI MECANISME DE DEFECTARE

*Titu-Marius I. Băjenescu, Dr.ing. prof.*

*C. F. C., La Conversion, Elveția*

### 1. INTRODUCERE

Actualele sisteme de informații se bazează în mare măsură pe tehnologiile de micro-unde folosite în comunicațiile fără fir, care se orientează către undele milimetrice, pentru a răspunde cerințelor de mărire a benzii de trecere și de îmbunătățire a performanțelor. Dezvoltarea are loc ca urmare a cererilor din ce în ce mai mari, atât ale societății civile, cât și ale anumitor sectoare industriale (automobilul, robotica, apărarea țării, medicină, etc.). Toate aceste sisteme trebuie să fie reconfigurabile, versatile și conviviale, la un cost de cost cât mai scăzut. Din acest punct de vedere, telefonul portabil este un exemplu; el nu mai este un simplu mijloc de comunicare, căci i s-au adăugat o mulțime de alte funcții utile (Internet, GPS, televiziune ș. a.) care necesită noi canale și o mărire a benzilor de trecere. Aceasta conduce la o cerere cu dorințe din ce în ce mai mari privind performanțele dispozitivelor care alcătuiesc aceste sisteme, cât și la o evoluție a materialelor integrate în aceste dispozitive.

De câțiva ani buni, noi tehnologii microelectronice (cum ar fi micro-uzinarea suprafeței) sunt folosite pentru realizarea de componente mecanice la scară micrometrică; acestea sunt așa numitele MEMS<sup>1</sup>. Conceptul MEMS (*Micro-Electro-Mechanical-System*) a luat naștere în anii 1980 la Berkley, ca o prelungire tehnologică a microelectronicii bazată pe siliciu; ideea era de a completa tehnologiile pentru a trece de la circuitul electronic la micro sisteme integrate. MEMS integrează pe un singur substrat semiconductor elemente electronice (circuite integrate, piezorezistențe, condensatoare), mecanice

(cantilever<sup>2</sup>, micro-comutatoare), optice (de exemplu, comutatoare optice sau micro-oglinzi), electromagnetice, termice și fluidice (senzori de curgere), fiind în stare să măsoare parametri fizici din mediul ambiant (presiune, accelerație, gaz etc.), dar și să acționeze (având integrate dispozitive mecanice la nivel micro: motoare, relee, pârghii etc.). Sunt considerate dispozitive ‘inteligente’, pentru că dispun de o capacitate de calcul încorporată [1].

Oricât de interesante ar fi micro sistemele din punctul de vedere al integrării multifuncționale, ele trebuie să-și poată îndeplini misiunea în condiții de utilizare (incluzând mediul ambiant) care pot fi dificile (profilul misiunii), cu o fiabilitate ridicată, controlată și previzibilă. Or, complexitatea micro sistemelor, multidisciplinaritatea lor, eterogenitatea materialelor folosite și interfețele cu mediul ambiant exterior constituie provocări noi în evaluarea fiabilității unui micro sistem. Evaluarea predictivă a fiabilității micro sistemelor este în centrul atenției lucrării [2].

Necesitatea de a evalua fiabilitatea unui sistem este la fel de veche ca și sistemul însuși. Multă vreme, urmând logica legilor fundamentale ale fiabilității, fiabilitatea era realizată prin simplificarea sistemelor și alegerea componentelor cu rată de defectare redusă. Această abordare s-a dovedit insuficientă pentru a prezice fiabilitatea unui circuit integrat complex. În loc să se considere fiabilitatea globală drept rezultat *bottom-up* al fiabilității elementelor constitutive, tendința a fost să se califice tehnologia de producție, măsurând, cu mijloace statistice, rata de defectare a circuitelor produse – de cele mai multe ori în mari cantități. Îmbunătățirea fiabilității circuitelor electronice a impus progresiv utilizarea testelor de îmbătrânire accelerată pentru a putea atinge valori măsurabile ale ratei de defectare. Astăzi se poate afirma că pe baza unor procedee calificate, producția de masă, calitatea și fiabilitatea produselor este asigurată.

În cazul micro sistemelor cu foarte mare valoare adăugată, construite în serii mici și mijlocii, problema este complet diferită, deoarece costurile

<sup>1</sup> Un microsystem conține, integrate pe un singur cip, un senzor, un actuator (componentă mecanică) și electronica anexă. Capsula lui asigură protecția cipului împotriva mediului ambiant, fiind simultan o interfață între senzor și mediul ambiant, adesea agresiv. Dimensiunile reduse ale elementelor mecanice ale actuatorului produc noi mecanisme de defectare (sticțiune, fricțiune, uzură, etc.), încă insuficient studiate. Trebuie să ținem seama și de interacțiunile dintre fiabilitatea mecanică, electrică și materială și de cea de a treia dimensiune a structurii (profundimea), care nu mai poate fi ignorată.

<sup>2</sup> Cantileverul este o grindă în consolă, adică susținută doar la un capăt [1].



Componentele din noua generație reunite sub sigla anglo-saxonă "RF MEMS" (*Radio Frequency Micro Electro Mechanical Systems*) sunt foarte variate atât prin forma, cât și prin funcționalitățile lor, fiind destinate unor multiple aplicații. Utilizate în hiperfrecvențe, ele permit realizarea de circuite cu caracteristici agile sau reconfigurabile, aducând o importanță îmbunătățire performanțelor – care nu pot fi atinse cu ajutorul componentelor tradiționale. Micro-comutatoarele RF MEMS sunt o tehnologie promițătoare pentru aplicațiile industriale din domeniul telecomunicațiilor. Industrializarea lor este încetinită însă de probleme de fiabilitate; doi parametri-cheie pun încă probleme: dependența de mediul ambiant (*packaging*) și fenomenul încărcării straturilor subțiri dielectrice din actuatorile electrostatice.

Există astăzi o mulțime de componente RF MEMS realizate în laboratoarele institutelor de cercetare și/sau ale universităților și/sau ale industriei specializate. Eforturile depuse de cercetare sunt răspunsul la puternica cerere de aplicații în telecomunicații, dar – mai cu seamă – la necesitățile crescânde din domeniile militar și spațial. Încă din deceniul 90, multe publicații care prezentau rezultatele cercetărilor din domeniu s-au ocupat de problemele de fiabilitate, căci ea reprezintă - și reprezintă - una din limitările principale ale dispozitivelor RF MEMS în materie de industrializare și comercializare. Într-adevăr, dispozitivele puse la punct trebuie să suporte mai multe zeci sau sute de miliarde de cicluri, pentru a putea demonstra o fiabilitate interesantă. Căci fiabilitatea este un parametru care dă o idee de progresele realizate în domeniu și de importantele eforturi depuse de laboratoarele de cercetări pentru a pune în valoare realizările lor. Firește, și alți parametri pot oglindi fiabilitatea (împachetarea - *packaging* -, ținuta de putere RF, degradarea contactelor metal-metal ș. a.). Toți acești parametri oglindesc principalele aspecte ale industrializării lor, nu numai din punct de vedere fiabilistic, ci și în termeni de cost al producției. Miniaturizarea, mărirea fiabilității și micșorarea costurilor componentelor electronice sunt principalele preocupări ale cercetătorilor și ale industriilor din acest domeniu.

## 2. STADIUL ACTUAL

Conform studiului [10] și al tezei de doctorat [14], până acum trei componente au demonstrat o bună fiabilitate (figura 2): comutatorul cu contact

ohmic Radant-MEMS [11] și comutatoarele capacitive ale MIT-LL [12] și cel de la Raytheon [13].

Înteruperile de dielectric sau defectările datorită străpunerii dielectricului intervin în diferite materiale dielectrice care compun RF MEMS. Tipul acesta de defectare este ireversibil. În mod specific, problemele legate de ruperea dielectricului în componentele electronice se împart în două categorii [3-5]: Descărcări electrostatice (ESD – *electrostatic discharges*) și suprasarcini electrice (EOS - *electrical overstresses*). În ambele cazuri defectarea este produsă de către un arc sau de o arborescență electrică spontană care apare în componentă, într-o zonă dielectrică supusă unui puternic câmp electric.

## 3. MECANISME DE DEFECTARE (MD)

Articolul [19] analizează diferite MD, cum ar fi: sticțiunea (*stiction*), încrețirea (*creep*), oboseala (*fatigue*), oboseala de fragilizare (*brittle fatigue*) în siliciu, uzura (*wear*), încărcarea dielectricului (*dielectric charging*), străpungerea, contaminarea și asamblarea.

**Sticțiunea** (*stiction*) este o prescurtare a expresiei în limba engleză '*static friction*', care înseamnă fricțiune statică și descrie fenomenul care face ca două plăci paralele presate una peste alta să înțepenească (*stick*) în această poziție. Este necesar un anumit prag al forței repulsive, pentru a se depăși această coeziune statică [1]. Forțele van der Waals sunt o cauză posibilă a fenomenului. Ele sunt forțe atractive sau repulsive între molecule (altele decât legăturile covalente sau interacțiunile electrostatice ale ionilor între ei sau cu molecule neutre) și includ: (i) Forțe între dipolii permanenți, (ii) Forțe între dipolii permanenți și dipolii induși, și (iii) Forțe între dipolii induși instantaneu și dipolii induși. Legătura de hidrogen poate și ea să fie responsabilă pentru sticțiune: aceasta este forța atractivă dintre hidrogenul atașat la atomul electronegativ al unei molecule și atomul electronegativ al unei alte molecule. Alte cauze posibile ale sticțiunii sunt forțele electrostatice sau crearea de poduri solide (*solid bridging*). Dacă are loc în timpul funcționării, sticțiunea poate duce la descărcare electrostatică, ce produce un arc electric între suprafețele electrozilor, ba chiar o microtopire. Umiditatea este un puternic factor detrimental, schimbând proprietățile suprafeței și favorizând sticțiunea între suprafețe. Totuși, se poate evita sticțiunea prin asamblarea de monostraturi de suprafață sau prin proiectarea unor suprafețe de energie scăzută [1].

**Capsula** unui microsystem este o importantă sursă de riscuri de defectare, mai ales din cauza faptului că trebuie să îndeplinească două funcții contradictorii: să protejeze cipul de mediu (ca la oricare dispozitiv microelectronic), dar și să asigure interacțiunea cu mediul, deoarece microsystemul are și o funcție de senzor, care implică accesul la mediu. Analiza transferului de căldură și managementul termic devin din această cauză mai complexe, dar și din cauza încapsulării unor diferite componente funcționale într-un spațiu îngust. Configurația sistemului devine importantă pentru disiparea de căldură dinspre sistem înspre mediul înconjurător [1]. În general, strategiile de transfer al căldurii într-un microsystem au două componente: mai întâi să difuzeze cât mai rapid căldura de la sursa de căldură, apoi să maximizeze disiparea de energie de la sistem la mediu.

#### 4. STRESURI OPERAȚIONALE ȘI AMBIENTALE

**Oboseala mecanică sau termică** poate apărea în timpul unei sarcini (mecanice sau termice) ciclice, sub pragul de fracturare al materialului, fiind indusă de formarea pe suprafață a unor microcărăpături și deformări plastic localizate. Oboseala mecanică este degradarea progresivă a materialului, ducând la defectare atunci când acumularea de defecte devine critică. Efectul de oboseală este evident în structuri supuse unor oscilații sau suspensii elastice. Mulți senzori și actuatori operează ca actuatori termici și sunt subiecți ai oboselei termice, depinzând de gradientii relevanți de temperatură și de nivelurile structurale de stres care rezultă din ciclarea termică sau temperatura ridicată [1]. Integritatea structurală a multor componente aflate sub stres ridicat este crucială pentru evitarea fracturării lor; forța mecanică este parametrul utilizat pentru a defini robustețea materialului, care trebuie maximizată. Existența unor suprafețe care vin în contact cere controlul atent al proprietăților de adeziune, pentru a se evita defectările de contact. Stresarea termică și relaxarea termică, produse de variațiile de temperatură, pot provoca delaminări ale materialului și oboseală termică în cantilevere. La schimbări mari de temperatură, cum sunt cele care apar în spațiul cosmic, bârnelor bimetalice pot avea probleme de fiabilitate din cauza nepotrivirii CTE [20].

Vibrațiile pot produce defectări prin inducerea **adeziunii suprafeței** sau prin **fracturarea** structurii de suport a dispozitivului. Vibrațiile pe

termen lung contribuie și la **oboseală**. De exemplu, microrelele MEMS (cantilevere sau comutatoare optice) pot induce inversarea stresului maxim în structură, de la tensiune la compresie și invers. Amplitudinea acestor stresuri alternative poate fi intensificată semnificativ în zonele în care sunt localizate creșteri de stres [1]. Dispozitivul este apoi supus unor stresuri ciclice cu magnitudini mari și poate ajunge la defectare structurală din cauza oboselei materialului. Oboseala indusă de vibrații este mai periculoasă la MEMS care folosesc polimeri sau materiale plastice [21].

**Fracturarea** apare atunci când sarcina pe un microdispozitiv este mai mare decât tăria (*strength*) materialului [1]. Fracturarea este o preocupare serioasă de fiabilitate. Pentru materiale fragile, fracturarea duce imediat la defectări catastrofice; pentru materiale mai puțin fragile, repetarea sarcinii pentru o lungă perioadă de timp produce oboseala, care duce și ea la fracturarea dispozitivului. În principiu, acest mod de defectare este relativ ușor de observat și simplu de prezis, dacă proprietățile de material ale peliculei subțiri sunt cunoscute. Multe microsysteme operează în vecinătatea limitei de disipare termică, acolo unde petele fierbinți (*hot spots*) pot iniția defectarea, în special la structuri slabe (diafragme sau cantilevere) [20].

**Încrêțirea** (*creep*) este un MD care apare după o lungă perioadă de funcționare, fiind produsă de transferul de masă dependent de timp, prin mecanisme de alunecare și difuzie induse de stresuri mari și de gradienti mari. Pe măsură ce temperatura de contact crește, se observă o modificare a proprietăților mecanice ale contactului, ale topologiei de contact și o diminuare a dependenței de timp a efectului de încrêțire.

**Presiunea ambientală** poate și ea să modifice caracteristicile microsystemelor. De exemplu, în cazul MEMS actuate termic, prezența vidului are un efect detrimental, pentru că reduce disiparea căldurii, ceea ce duce la creșterea rezistenței termice, provocând în final chiar ambalarea termică (*thermal runaway*) [22-24].

#### 5. INJEȚII ȘI CAPCANE DE SARCINI

Încărcarea dielectricului este principalul mecanism de defectare al dispozitivelor capacitive RF MEMS, căci pentru a reduce puntea este necesar să se aplice o tensiune de polarizare de curent continuu de câteva zeci de volți asupra unui dielectric având o grosime de cel puțin un micron, plasat pe electrodul de activare, pentru a evita orice scurt-circuit. În acest

caz, dielectricul este supus unui câmp electric mai mare de 100 mV/m, ceea ce antrenează apariția mecanismelor de conducție electronică în dielectric, corespunzând unei injecții și unei capcane de sarcini în izolant. Fenomenul se traduce printr-o derivă a tensiunilor de control ale sistemului de comandă RF MEMS, până când se produce o defectare. Studiul acestui mod de defectare a făcut obiectul de studiu a numeroase articole [6-9], publicate în ultimii 12 ani.

## 6. MODURI DE DEFECTARE MECANICE

**Defectare și rupere mecanică.** Când un material solid este supus unei forțe mecanice, el se deformează sub acțiunea sa. Distingem trei categorii de deformații: elastică (pentru care materialul se deformează sub acțiunea forței, dar revine apoi la starea sa inițială), plastică și elastoplastică (pentru care deformările materialului sunt ireversibile, materialul nerevenind la starea sa inițială după deteriorare) și ruperea (distrugerea).

Astfel, când un MEMS se deformează, ultimele două cazuri de deformare citate corespund la moduri de defectare, întrucât MEMS nu revine la starea sa inițială după încetarea solicitărilor [14].

**Fluajul** este un fenomen prezent într-un solid supus unei constrângeri mecanice permanente. El este accelerat de temperatură, modifică parametrii mecanici ai solidului și este prezent în majoritatea dispozitivelor RF MEMS. Chiar dacă deplasările bănelor MEMS au loc pe distanțe foarte mici, ele pot fi supuse la constrângeri de lungă durată sau pot fi mult repetate. Schimbarea proprietăților mecanice ale bănelor va modifica așadar atât răspunsul la sistemul de comandă, cât și performanțele RF ale componentei. Fluajul este astfel identificat ca un mod de defectare RF MEMS [15]. Dificultatea majoră a caracterizării fluajului este că el perturbă în același fel funcționarea RF MEMS ca și încărcarea dielectricului. O soluție ar fi să se caracterizeze direct materialele componente, pentru a vedea cum fluează ele și dacă vor putea fi utilizate. Este, la ora actuală, metoda cea mai folosită. Fluajul antrenează în timp (zeci de ore) și deriva frecvenței de rezonanță, perturbând astfel sistemul RF.

**Degradarea contactelor.** Una din principalele cauze de defectare a micro-

comutatoarelor RF MEMS cu contact ohmic este degradarea contactelor rezistive. Stabilitatea

contactului condiționează buna funcționare a acestui tip de comutator. Mecanisme de întărire a materialelor de contact, de aderență, de colaj datorită unei microfuziuni, de transfer de materiale, de depozite organice sau de contaminare a suprafeței pot să apară și să deterioreze dispozitivul pe termen lung, din cauza unei puternice creșteri a rezistenței de contact. În general, în afară de forța de contact, performanțele de contact sunt funcție de mai mulți factori, depinzând de câțiva parametri predominanți: materialele de contact, procedeele de fabricație, intensitatea curentului care traversează contactul (în funcție de puterea semnalului) și mediul ambiant în care funcționează componenta.

## 7. DEFECTĂRI DEPINZÂND DE PUTEREA MICRO-UNDEI

**Auto-activarea și auto-menținerea** sunt moduri de defectare funcționale și reversibile ale RF MEMS. Auto-activarea corespunde coborârii nedorite sau accidentale a bănei mobile a RF MEMS cu ocazia utilizării componente, în cazul în care componenta a fost folosită cu o putere RF prea mare, când nici o tensiune de comandă nu e aplicată. Aplicând componente o putere RF, aceasta va provoca o forță de atracție asupra bănei, echivalentă cu o forță electrostatică (puterea RF crează o tensiune eficace în actuatorul electrostatic). Când puterea RF depășește o valoare critică (denumită putere de auto-activare), această forță depășește forța de rechemare mecanică iar bâna coboară, ceea ce provoacă defectarea. Auto-menținerea este observată când comutatorul este acționat în prezența puterii RF și când tensiunea de comandă este nulă. Defectarea este observată deoarece bâna nu revine în starea de funcționare normală și rămâne coborâtă, menținută în această poziție de puterea RF prezentă în actuator.

În cazul unei comutări "la cald", puterea RF est continuă iar cele două defectări pot fi observate, limitând astfel utilizarea RF MEMS la puterea RF. Cum puterea de auto-activare este superioară puterii de auto-menținere, aceasta din urmă va defini puterea admisibilă a structurii. În comutarea "la rece", puterea este tăiată în timpul comutărilor și doar auto-activarea poate exista, limitând funcționarea RF MEMS.

**Defectări legate de efecte termice.** Folosirea componentelor MEMS având aplicată o mare putere RF conduce la creșterea temperaturii de funcționare; acesta este un parametru primordial pentru mai multe

moduri de defectare, deoarece ea va avea adesea drept efect accelerarea mecanismelor respective.

**Defectările legate de temperatură** corespund modificării produse de puterea RF și de temperatura de funcționare, de constrângerea reziduală și de gradientul constrângerii în structura metalică. Aceasta se traduce printr-o schimbare a valorii constantei de rigiditate și deci a forței de rechemare a actuatorului electrostatic. Cu variația gradientului constrângerii în funcție de temperatură, bârna va avea o curbă modificată, iar tensiunile de activare nu vor mai fi aceleași. Gradientul constrângerii cât și variabilitatea sa în funcție de temperatură sunt, în principal, dependente de structura bârnei (grosimea și natura materialelor folosite). De reținut că aceste mecanisme de defectare pot induce o modificare de tipul deformației mecanice a bârnei (reversibilă sau ireversibilă). Într-adevăr, cu puterea RF aplicată, pot să apară deformații elastice; bârna va reveni în poziția sa inițială după dispariția puterii (revenirea la temperatura ambiantă), sau vor apare deformări ireversibile, traducându-se printr-o defectare permanentă (componentă deteriorată). Pentru micșorarea efectului termic se recomandă să se fabrice bârna RF MEMS folosind un strat monocristalin fără constrângeri reziduale sau, dimpotrivă, alegând un strat cu puternice constrângeri [16]. Aceste două tipuri de comutatoare au arătat că ele pot rezista la temperaturi ridicate (în jur de 200°C) și pot suporta cicluri de temperatură, fără să se observe degradări importante ale performanțelor lor.

**Electromigrarea.** Fenomenul acesta se datorește puternicilor curenți electrici care traversează structura metalică a componentei. El se traduce printr-o deplasare a atomilor provocată de o mișcare a ionilor în conductor, datorită transferului care are loc între electronii de conducție și atomii de difuzie metalică. Acest fenomen este important în cazul densităților mari de curent. În plus, electromigrarea este și mai importantă la frecvențe înalte, deoarece densitățile de curent sunt mărite din cauza concentrării de câmpuri electromagnetice la periferia conductoarelor.

**Defectări legate de mediul ambiant exterior.** Comutatoarele RF MEMS trebuie să poată funcționa în condiții ambientale dificile (temperatură, șoc, umiditate, presiune, etc.) pentru ca industrializarea lor să poată deveni posibilă. Or, a face ca performanțele componentei să fie independente de mediu - știind că o parte a componentei este mobilă și trebuie să aibă o mișcare identică, oricare ar fi condițiile mediului

ambiant -, aceasta este o problemă nouă în microelectronică. Într-adevăr este necesar să protejăm componenta încapsulând-o, păstrând în interiorul capsulei o atmosferă neutră sau vid, pentru a optimiza funcționarea mecanică a RF MEMS. Publicații recente [17-18] au arătat că tehnicile de încapsulare "waferlevel" și depunerea unui film subțire sunt, în momentul de față, cele mai reușite - cu toate că etanșeitatea n-a fost încă perfect demonstrată până acum.

## 8. CONCLUZII

Numeroase moduri de defectare limitează mult fiabilitatea acestor componente, ea depinzând de mecanisme electrice, mecanice, datorită puterii micro-unde și mediului ambiant în care componenta funcționează.

În materie de fiabilitate așadar, mai rămân multe de făcut, pentru a micșora compromisul dintre fiabilitate și performanțele micro-undelor. Într-adevăr, folosirea unei tehnologii fiabile duce adesea la reducerea performanțelor dorite (sau impuse) inițial.

O altă problemă importantă legată de fiabilitatea RF MEMS este reproductibilitatea, căci tehnicile de fabricare a MEMS folosesc deseori metode de depunere și de gravură a filmelor subțiri complexe.

## References

1. **Băjenescu, T.-M., M. Bâzu.** *Mecanisme de defectare ale componentelor electronice, cap. 10, Matrix Rom, București, 2012.*
2. **Matmat, M.** *Pour une approche complète de l'évaluation de fiabilité dans les microsystèmes, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 3 septembre 2010.*  
<http://www.theses.fr/2010ISAT0017/document>
3. **Ruan, J. J.** *Analyse et modélisation de l'impact des décharges électrostatiques et des agressions électromagnétiques sur les micro-commutateurs microondes (MEMS-RF), Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.*
4. **Walraven, J. A. et al.** *Electrostatic discharge /electrical overstress susceptibility in MEMS: a new failure mode. SPIE, vol. 4180(2000), pp 30-39.*
5. **Walraven, J. A. et al-** *Failure analysis of radio frequency RF microelectromechanical systems MEMS. Proc. of SPIE vol. 4558(2001), pp 254-259.*
6. **Reid, J. R.** *Simulation and Measurement of Dielectric Charging in Capacitive Microwave*

Switches. *Modeling and Simulation of Microsystems*, vol. 1(2002), pp. 250-253.

7. **Wibbeler, J.**, et al., "Parasitic Charging of Dielectric Surfaces in Capacitive Microelectromechanical Systems (MEMS)", *Sensors and Actuators*, 1998, A: Physical, pp.74-80.

8. **Goldsmith, C.** et al. *Lifetime Characterization of Capacitive RF MEMS Switches*. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Phoenix, USA, vol. 1(2001), pp. 227-230.

9. **van Spengen, W. M.** et al. *Experimental Characterization of Stiction Due to Charging in RF MEMS*. *International. Electron Devices Meeting*, 2002, San Francisco, USA, pp. 901-904.

10. **Rebeiz, G. M.** et al. *Tuning In to RF MEMS*. *IEEE Microwave Magazine*, vol. 10(2009), no. 6, pp. 55-72.

11. **Newman, H. S.** et al. *Lifetime Measurements on a High-Reliability RF-MEMS Contact Switch*. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, vol. 18(2008), no. 2, pp. 100-102.

12. **Muldavin, J.** et al. *Wafer-Scale Packaged Radio Frequency Microelectromechanical Switches*. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 56(2008), no. 2, pp. 522-529.

13. **Pillans, B.** et al. *RF Power Handling of Capacitive RF-MEMS Devices*. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Seattle, June 2002, pp. 329-332.

14. **Mardivirin, D.** *Etude des mécanismes mis en jeu dans la fiabilité des micro-commutateurs MEMS-RF*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2010.

15. **Gils, M.** et al. *Evaluation of Creep in RF MEMS Devices*. *Internat. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems*, EuroSime 2007, pp.1-6.

16. **Duffy, S.** et al. *MEMS Microswitches for Reconfigurable Microwave Circuitry*. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11(2001), n° 3, pp. 106-108.

17. [http://www.radantmems.com/radantmems\\_data/Library/MTT\\_2003summary022403.pdf](http://www.radantmems.com/radantmems_data/Library/MTT_2003summary022403.pdf)

18. [http://www.memtronics.com/page.aspx?page\\_id=36](http://www.memtronics.com/page.aspx?page_id=36)

19. **van Spengen, W. M.** *MEMS Reliability from a Failure Mechanisms Perspective*. *Microelectronics Reliability*, Vol. 43 (2003), Issue 7, pp. 1049-1060.

20. **Bhushan, Bh.** (ed.). *Nanotechnology*, New York, Springer, 2006.

21. **Hsu, T. R.** *Reliability in MEMS Packaging*. 44th International Reliability Physics Symposium, San Jose, CA, March 26-30, 2006.

22. **Bâzu, M.** et al. *Quantitative Accelerated Life Testing of MEMS Accelerometers*. *Sensors*, Vol. 7, December 2007, pp. 2846-2859.

23. **Kurth, S.** et al. *Reliability Enhancement of Ohmic RF MEMS switches*. *SPIE Proc.*, Vol. 7928-11(2011), Photonics West, San Francisco, USA, January 22-27, 2011.

24. **Siegel, Ch.** *Entwicklung und Charakterisierung einer zuverlässigen Technologie für Mikro-Elektro-Mechanische Systeme als Mikrowellenbauelemente*, Dissertation, Universität Ulm, 2008.