ANALISI E PROGETTO DI DISPOSITIVI MEMS MEDIANTE LA TECNICA FDTD

A. Fantauzzi, P. Mezzanotte, R. Sorrentino

Dipartimento di Ingegneria Elettronica e dell'Informazione, Università di Perugia
via G. Duranti 93, 06125 Perugia
midnite@diei.unipg.it

Abstract

This paper proposes an accurate analysis of Micro-electromechnanical (MEM) switches using the Lumped Element-Finite Difference Time Domain (LE-FDTD) method enriched of the Short-Open Calibration (SOC) technique. The application of this method allows the electrical behavior of MEM switches to be accurately predicted while reducing the computational CPU time.

INTRODUZIONE

I sistemi Micro-Elettro-Meccanici (MEMS) sono dei dispositivi miniaturizzati che funzionano combinando insieme proprietà elettriche e meccaniche, realizzati mediante processi tecnologici compatibili con quelli per i circuiti integrati CMOS.
Questi nuovi micro-componenti si prestano per l'applicazione in diversi campi. In particolare i MEMS hanno un ruolo di primo piano nell'area delle comunicazioni a radiofrequenza (RF) *wireless* sia terrestri che satellitari, grazie alle loro dimensioni ridotte, alle basse perdite di inserzione, all'elevato isolamento ed alta linearità.
Per le ragioni esposte, l'uso dei MEMS nella realizzazione di circuiti RF integrati riconfigurabili [1-7] che operino fino alla frequenza di 100 GHz [8-11] sta sempre più divenendo argomento di interesse da parte dei ricercatori e delle aziende del settore.
I dispositivi più comuni e a cui si farà riferimento nel resto dell'articolo sono i *microswitch*, dispositivi che garantiscono delle prestazioni incomparabili con quelle dei preesistenti *switch* a stato solido in tecnologia FET o a diodi p-i-n.
I MEM *switch* sono classificati in base alla natura del contatto che può essere del tipo resistivo o capacitivo. I dispositivi sono inseriti lungo le linee, in parallelo, in serie o, in configurazioni combinate [7]. In entrambi i casi un "bridge" o un "cantilever", sospeso al di sopra di una linea di trasmissione, è attratto da una forza elettrostatica verso la linea sottostante fino a quando non avviene il contatto.
Le applicazioni dei MEMS *switch* vanno dai *phased array* a filtri ed antenne riconfigurabili, a VCO [12] e *switch* T/R. A fronte dei vantaggi menzionati poco sopra, gli *switch* realizzati in questa tecnologia presentano anche degli svantaggi; uno dei più significativi è sicuramente il tempo di *switch*; essendo infatti un MEM *switch* per sua natura anche meccanico e quindi naturalmente "lento" ad attuarsi e dovendo inoltre raggiungere un compromesso tra tempo di *switch* e affidabilità a lungo termine [5] si è stimato che il limite minimo per questo parametro sia di 1 µs.
Altro aspetto critico è quello del *packaging* di queste strutture: gli *switch* MEM essendo lunghi 250-350 µs e avendo uno spessore di 0,5-1,5 µs, sono molto sensibili alle condizioni dell'ambiente in cui funzionano e quindi devono avere dei *package* ermetici riempiti con del gas inerte. Inoltre le alte temperature in gioco nel processo di

packaging possono arcuare i ponti rendendoli inutilizzabili. Infine fenomeni di auto-attuazione e la possibilità di danneggiamenti dovuti alle alte temperature limitano la potenza massima del segnale RF a non più di 20 –50 mW.
Non solo il processo tecnologico ma anche il progetto di questi *switch* è ancora in una fase preliminare a causa della mancanza di modelli elettromagnetici (EM) affidabili. Il progetto di un MEMS è infatti un arduo compito vista la simultanea dipendenza delle performance complessive sia dall'ambito elettrico, che meccanico che termico del dispositivo.
Negli ultimi anni, diversi CAD orientati al disegno di MEMS sono apparsi sul mercato e ognuno di questi include simulatori in grado di tenere in conto diversi ambiti di indagine che il progetto di un MEMS presuppone. Ma dal punto di vista EM questi strumenti presentano delle notevoli limitazioni, essendo il comportamento EM delle strutture analizzato sulla base di semplicistici modelli circuitali.
Con un approccio di questo tipo è inevitabile che, effetti importanti dovuti alle alte frequenze di funzionamento e alla larga scala di integrazione, vengano completamente ignorati; solo dei CAD basati sulla diretta soluzione delle equazioni di Maxwell possono tenere in conto tutti i fenomeni sopra citati. Nel seguito è presentato il metodo alle differenze finite nel dominio del tempo (FDTD) ed è mostrata la sua affidabilità e fruibilità nella simulazione numerica di dispositivi MEMS; sono anche descritti recenti sviluppi apportati per migliorare l'efficienza del metodo.

IL METODO FDTD

Il metodo FDTD è basato sulla diretta soluzione delle equazioni di Maxwell nel dominio del tempo. A questo scopo il tempo e lo spazio sono discretizzate secondo l'algoritmo di Yee [13]: in particolare, lo spazio è diviso in un numero finito di celle elementari usate dove vengono collocati i campi elettrico e magnetico. La soluzione nel dominio del tempo è ottenuto mediante uno schema iterativo che valuta le componenti di campo elettrico e magnetico in istanti temporali alternati. Il metodo di base è stato ampliato implementando il grigliato variabile [14], diverse condizioni al contorno assorbenti (*Absorbing Boundary Conditions*) [15], [16] ed elementi concentrati [17], [18], [19] che permettono un'analisi completa di strutture complesse.
L'algoritmo FDTD arricchito di questi strumenti è un ottimo candidato per modellare da un punto di vista EM dispositivi di tipo MEM. Usando i modelli concentrati di un generatore di tensione e di un resistore, possiamo chiudere la struttura su porte concentrate; così facendo, si evita di utilizzare ABC con un conseguente risparmio computazionale; allo stesso tempo però introduciamo una discontinuità associata alla giunzione tra generatore (o carico concentrato) e linea eccitata/caricata. Questa discontinuità ha natura numerica ed è dovuta all'interfaccia tra circuiti distribuiti ed elementi concentrati. Per risolvere questo problema il gruppo dell'Università di Perugia ha implementato nel simulatore FDTD una tecnica numerica ben nota ([20], [21]), chiamata calibrazione *Short-Open* (SOC) [22]. L'applicazione della procedura SOC permette di rimuovere questo errore sistematico, aumentando così l'accuratezza dei risultati.

RISULTATI

Lo *switch* MEM capacitivo proposto in [23] è stato scelto come primo dispositivo di test per mettere in evidenza l'apprezzabile miglioramento nell'accuratezza dei risultati che si ottiene utilizzando la calibrazione SOC applicata alla simulazione LE-FDTD. Il dispositivo consiste di una sottile membrana metallica (*bridge*) sospesa al di sopra del conduttore centrale della CPW e ancorata ai piani di massa della stessa alle due estremità. Il circuito equivalente più semplice è costituito da una capacità variabile verso massa che passa da un valore dell'ordine delle decine di fF con il ponte in *Up state*, a qualche pF quando viene attuato (segnale RF cortocircuitato a massa). Le figure 1 e 2 mostrano rispettivamente il confronto tra le misure e le simulazioni, con e senza l'ausilio della tecnica SOC, delle perdite di riflessione in *Up state* e dell'isolamento in *Down state* confermando la bontà di tale tecnica di calibrazione. Il disallineamento tra la frequenza di risonanza simulata e misurata che si evidenzia in figura 3 è imputabile alla rugosità dei materiali a contatto che provoca uno spostamento in frequenza rispetto a quella ideale.

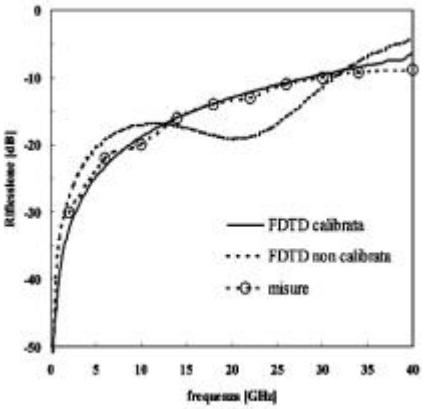

Figura 1: perdite per riflessione in Up state.

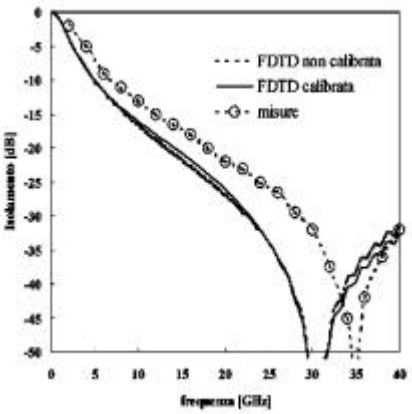

Figura 2: isolamento in Down state.

CONCLUSIONI

È stata presentata una breve descrizione delle principali aree di applicazione di dispositivi MEM, con particolare attenzione agli *switch* realizzati in questa tecnologia. È anche stata giustificata la necessità di sviluppare strumenti software (CAD) adeguati alla modellizzazione EM di questi innovativi dispositivi. Tra i simulatori EM al momento disponibili, il metodo FDTD qui descritto, sembra essere uno dei più promettenti per descrivere le caratteristiche dei MEMS. Le potenzialità e l'accuratezza dei risultati ottenuti attraverso questo metodo sono state confermate attraverso l'analisi FDTD di un MEM *switch* parallelo in CPW.

BIBLIOGRAFIA

[1] E.R. Brown, "RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.46, n.11, part 2, pp.1868-1880, Nov.1998.

[2] C. Jung-Chih, F. Yiton, D. Choudhury and L. Lih-Yuan, "MEMS millimetre wave components", *1999 IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest*, vol.2, pp.463-466, 1999.

[3] L.P.B. Katehi and G.M. Rebeiz,.: "Novel RF circuits using MEMS devices and silicon micromachining", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol.3, p.1246, 2000.
[4] L.P.B. Katehi, J.F. Harvey, and E. Brown, "MEMS and Si micromachined circuits for high-frequency applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.50 n.3, pp.858-866, Mar.2002.
[5] G.M. Rebeiz and J.B. Muldavin, "RF MEMS Switches and Switch Circuits", *IEEE Microwave Magazine*, pp.59-71, Dec.2001.
[6] J.B. Muldavin and G.M. Rebeiz, "Inline capacitive and DC-contact MEMS shunt switches", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.11, n.8 , pp.334-336, Aug.2001.
[7] J.B. Muldavin and G.M. Rebeiz, "All-metal high-isolation series and series/shunt MEMS switches", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.11, n.9, pp.373-375, Sep.2001.
[8] L. Vietzorreck, "Modeling of the millimeter-wave behaviour of MEMS capacitive switches", *1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol.4, pp.1685-1688, 1999.
[9] J. Rizk, T. Guan-Leng, J.B. Muldavin and G.M. Rebeiz, "High-isolation W-band MEMS switches", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.11, n.1, pp.10-12, Jan.2001.
[10] S. Duffy, C. Bozler, S. Rabe, J. Knecht, L. Travis, P. Wyatt, C. Keast and M. Gouker, "MEMS microswitches for reconfigurable microwave circuitry", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.11, n.3, pp.106-108, Mar.2001.
[11] K. Hong-Teuk, P. Jae-Hyoung, K. Yong-Kweon and K. Youngwoo, "Millimeter-wave micromachined tunable filters" *1999 IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest*, vol.3, pp.1235-1238, 1999.
[12] A. Dec and K. Suyama, "Microwave MEMS-based voltage-controlled oscillators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.48, n.11, part 1, pp.1943-1949, Nov.2000.
[13] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equation in Isotropic Media", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.14, pp.302-307, 1966.
[14] D. H. Choi and V. Hoefer, "A graded mesh FDTD algorithm for eigenvalue problems", *17th European Microwave Conference*, pp.413-417, Sep.1987.
[15] G. Mur, "Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol.EMC-23, pp.377-382, 1981.
[16] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetics waves", *J. Comput. Phys.*, vol.114, n.1, pp.185-200, 1994.
[17] W. Sui, D. Christensen and C. Durney, "Extending the two-dimensional FD-TD method to hybrid electromagnetic systems with active and passive lumped elements", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.40, pp.724-730, 1992.
[18] A. Taflove "Computational electrodynamics", Norwood, MA, Artech House Inc., 1995.
[19] P. Ciampolini, P. Mezzanotte, L. Roselli, and R. Sorrentino, "Accurate and efficient circuit simulation with lumped-element FDTD technique", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.44, pp.2207-2215, Dec.1996.
[20] L. Zhu and K. Wu, "Unified equivalent-circuit model of planar discontinuities suitable for field theory-based CAD and optimization of MMIC's", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.47, pp.1589-1602, Sep.1999.
[21] M. Farina and T. Rozzi, "A short-open de-embedding technique for MoM-based approaches", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.49, pp.624-628, Apr.2001.
[22] A. Fantauzzi, F. Alimenti, P. Mezzanotte, M. Farina and L. Roselli, "Short-open calibration technique for accurate LE-FDTD simulation of MEMS switches", accepted for publication on *Proc. of EuMW 2002, Milan, Italy*, Sep.2002.
[23] J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, "High-isolation CPW MEMs shunt switches - part 1: Modeling," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, pp. 1045–1052, Jun 2000.