

# **MODELLI A LINEA DI TRASMISSIONE DI NANO-INTERCONNESSIONI DI NANOTUBI DI CARBONIO A SINGOLA E A MULTIPLA PARETE**

*M. D'Amore, M.S. Sarto, A. Tamburrano*

Centro di Ricerca per le Nanotecnologie applicate all'Ingegneria della Sapienza (CNIS)  
Dipartimento di Ingegneria Elettrica  
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"  
Via Eudossiana 18, 00184, Roma

La progressiva miniaturizzazione di circuiti elettronici integrati e l'elevato livello di integrazione pongono dei seri limiti all'uso della tecnologia del rame per la realizzazione di nano-interconnessioni. La riduzione in scala delle interconnessioni in rame al di sotto dei 100 nm comporta infatti la degradazione delle proprietà conduttive del materiale e problemi di affidabilità in seguito a stress elettrici, meccanici e termici. Una delle più promettenti soluzioni è offerta dalla tecnologia dei nanotubi di carbonio.

I ricercatori dell'Unità hanno avviato da alcuni anni un'attività di ricerca finalizzata alla modellistica elettromagnetica di nano-interconnessioni costituite da nanotubi di carbonio. La linea di ricerca si inquadra peraltro nell'ambito del progetto di ricerca europeo CATHERINE che vede la collaborazione di importanti industrie e qualificati centri universitari che operano nel settore delle nanotecnologie.

La ricerca è stata condotta inizialmente con il fine di derivare secondo il formalismo di guida d'onda elettronica una rappresentazione a linea di trasmissione di un nanotubo di carbonio a parete singola (SWCNT) in configurazione orizzontale su piano perfettamente conduttore [1]. L'analisi è poi stata estesa a nanotubi di carbonio in configurazione verticale [2] e a fasci complessi di nanotubi di carbonio [3], [4].

Ulteriori studi sono stati condotti in [5]-[7] sull'integrità di segnale e sul cross-talk tra fasci di SWCNT mediante la formulazione completa di linea multiconduttore (MTL) e un modello equivalente semplificato a conduttore singolo (ESC).

Sulla base dei precedenti lavori, l'unità di ricerca ha poi sviluppato un modello di simulazione con approccio MTL per interconnessioni di nanotubi di carbonio a parete multipla (MWCNT) [8]-[10]. I parametri per unità di lunghezza del circuito equivalente sono stati derivati tenendo in considerazione il numero effettivo di canali conduttivi di ogni singola parete, l'attenuazione prodotta dallo scattering elettronico e l'accoppiamento magnetico ed elettrostatico tra le diverse pareti.

Simulazioni nel dominio del tempo e della frequenza sono state eseguite per predire la densità di corrente, l'attenuazione e il tempo di ritardo in funzione della lunghezza, della sezione dell'interconnessione e del numero di pareti conduttive del MWCNT. Utili informazioni sono infine state ottenute dal confronto con le prestazioni di tradizionali interconnessioni in rame.

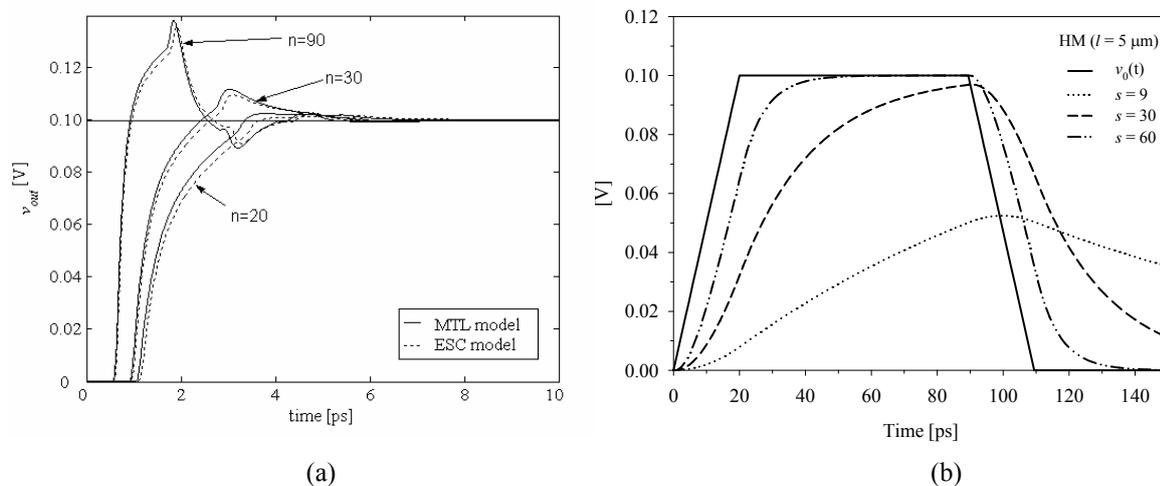


Figura 1. (a) Risposta al gradino di un'interconnessione lunga 20  $\mu\text{m}$  realizzata con un numero  $n$  di SWCNT paralleli e chiusa su una capacit  terminale  $C_L=10^{-4}\text{pF}$ . (b) Forma d'onda transitoria in uscita di un'interconnessione lunga 5  $\mu\text{m}$  costituita da un MWCNT con un numero  $s$  di pareti ed eccitato con un impulso trapezoidale.

### Pubblicazioni

- [1] M. D'Amore, M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Signal carrying capability of nano-transmission lines", ICEAA 2005, Torino, Italy, Sett. 2005.
- [2] M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Electromagnetic modelling of vertical carbon nanotube interconnects", Int. Symp. on EMC - EMC EUROPE 2006, Barcelona, Sept. 2006.
- [3] M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Multiconductor transmission line modeling of SWCNT bundles in common-mode excitation", 2006 IEEE Int. Symp. on EMC, Portland (OR), Aug. 2006.
- [4] M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Electromagnetic analysis of radio-frequency signal propagation along SWCN bundles", Int. Symp. IEEE-NANO 2006, Cincinnati, July 2006.
- [5] M. D'Amore, M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Signal integrity of carbon nanotube bundles", 2007 IEEE International Symposium on EMC, Honolulu, July 8-12, 2007.
- [6] M. D'Amore, M.S. Sarto, A. Tamburrano "Transient analysis of crosstalk coupling between high-speed carbon nanotube interconnects", 2008 IEEE Int. Symp. on EMC, Detroit (MI), Aug. 2008.
- [7] M. D'Amore, M. Ricci, A. Tamburrano "Equivalent single conductor modeling of carbon nanotube bundles for transient analysis of high-speed interconnects", Int. Symp. IEEE-NANO 2008, Arlington (TX), Aug 2008.
- [8] M. D'Amore, M.S. Sarto, A. Tamburano, "Modelling of multiwall carbon nanotube transmission lines", ICEAA 2007, Torino, Italy, Sett. 2007.
- [9] M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Transmission line model of multiwall carbon nanotube for next generation nano-interconnects", submitted to Journal of Physics: Condensed Matter, 2008.
- [10] M.S. Sarto, A. Tamburrano, "Equivalent Circuit Model of MWCNT Nanointerconnects", Int. Symp. IEEE-NANO 2008, Arlington (TX), Aug 2008.
- [11] M.S. Sarto, A. Tamburrano, M. D'Amore, "New Electron Waveguide Based Modelling for Carbon Nanotube Interconnects", in corso di pubblicazione.