

# ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI INTERCONNESSIONI AD ALTA VELOCITÀ BASATE SU NANOTUBI DI CARBONIO

L. Egiziano, A. Giustiniani, P. Lamberti, G. Spinelli, V. Tucci, W. Zamboni

Dipartimento di Ingegneria Elettronica e Ingegneria Informatica (DIEII)  
Università degli Studi di Salerno,  
Viale Ponte Don Melillo 1, 84084 Fisciano (SA)

I circuiti elettronici ad alta velocità, in cui segnali a larga banda si propagano lungo strutture elettromagnetiche, possono trarre un deciso beneficio dalla presenza di nanotubi di carbonio (CNT), specialmente alla scala nanometrica, ovvero sulle dimensioni caratteristiche previste per il prossimo futuro dalla ITRS [1]. Una particolare applicazione dei CNT, oggetto di numerosi studi recenti, è quella delle interconnessioni orizzontali, di sezioni di poche decine di nanometri e lunghezze dell'ordine dal micron al millimetro. Infatti, è ben noto che le prestazioni del rame a questa scala sono estremamente degradate e richiedono l'utilizzo di soluzioni alternative, e i CNT sono ottimi candidati alla sostituzione del rame grazie, principalmente, al notevole valore che assume il loro libero cammino medio (dell'ordine del micron). Le interconnessioni oggetto di studio in letteratura sono tipicamente costituite da fasci paralleli (*bundle*) di CNT a singola parete (*single-walled* CNT, SWCNT), o da CNT multiparete (*multiwalled*, MWCNT). L'interesse della ricerca nell'analisi delle prestazioni di tali interconnessioni è particolarmente viva in ambito internazionale. Al dibattito partecipa attivamente anche l'Unità di Salerno, principalmente nell'ambito del progetto UE "Carbon nAnotube Technology for High-speed nExt-geneRation nano-InterconNEcts (CATHERINE) [2-6]. Nella scelta tra la realizzazione tecnologica della nano interconnessione mediante *bundle* di SWCNT o con singoli MWCNT, l'analisi delle dipendenze dai parametri incerti insiti nei processi realizzativi ha mostrato la maggiore affidabilità dei MWCNT rispetto ai *bundle* in termini di robustezza della soluzione confermata sia dal bounding delle caratteristiche di propagazione in frequenza [4] che dalla risposta nel tempo [5]. Introducendo inoltre la dipendenza dalla temperatura delle proprietà conduttive dei MWCNT si è mostrato come è possibile giungere ad un progetto affidabile della nanoIC, agendo sui parametri di processo effettivamente controllabili, nel rispetto delle specifiche ITRS per particolari nodi tecnologici senza incidere sull'onere computazionale [6].

Dal punto di vista modellistico, sulla base di una descrizione macroscopica degli effetti quantistici presenti nella conduzione dei CNT, si è utilizzato un modello a linea di trasmissione multiconduttore (MTL) per l'analisi delle proprietà elettromagnetiche delle interconnessioni considerate [2], soprattutto dal punto di vista della compatibilità elettromagnetica [3]. Si è posta particolare attenzione alle interconnessioni realizzate con *bundle* di SWCNT (Fig. 1a), il cui schema elettrico equivalente è rappresentato in Fig. 1b. Sulla base della risposta in frequenza, la risposta dell'interconnessione nel dominio del tempo è stata ricostruita mediante IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*), derivando in maniera diretta il ritardo al 50% dei segnali trasmessi e di livelli di *crosstalk* cui è sottoposta la linea parallela. In particolare, si è provveduto a mostrare come sia effettivamente necessario utilizzare modelli distribuiti che includano anche il parametro di induttanza cinetica, spesso trascurato a favore di semplici modelli RC, talvolta concentrati. Inoltre, si è analizzato il comportamento delle interconnessioni al variare della posizione dei singoli CNT conduttivi

nella posizione trasversa (essi sono, tipicamente, un terzo dei nanotubi totali), della percentuale dei nanotubi conduttivi, dei rapporti d'aspetto delle sezioni delle interconnessioni, fino ad arrivare a considerare bundle in aderenza, opportunamente alimentati come due conduttori separati. Alcuni dei risultati sono riportati in Fig. 2.

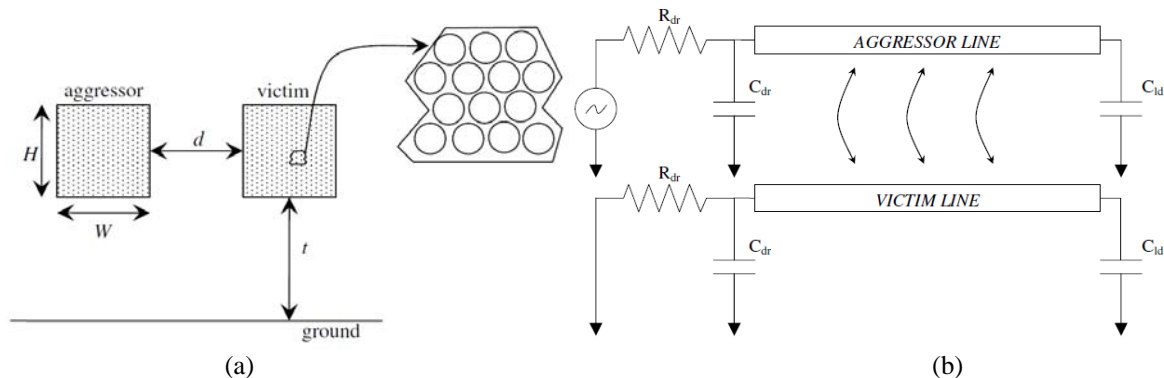


Figura 1. Sezione trasversa dell'interconnessione considerata (a) e schema elettrico equivalente (b)

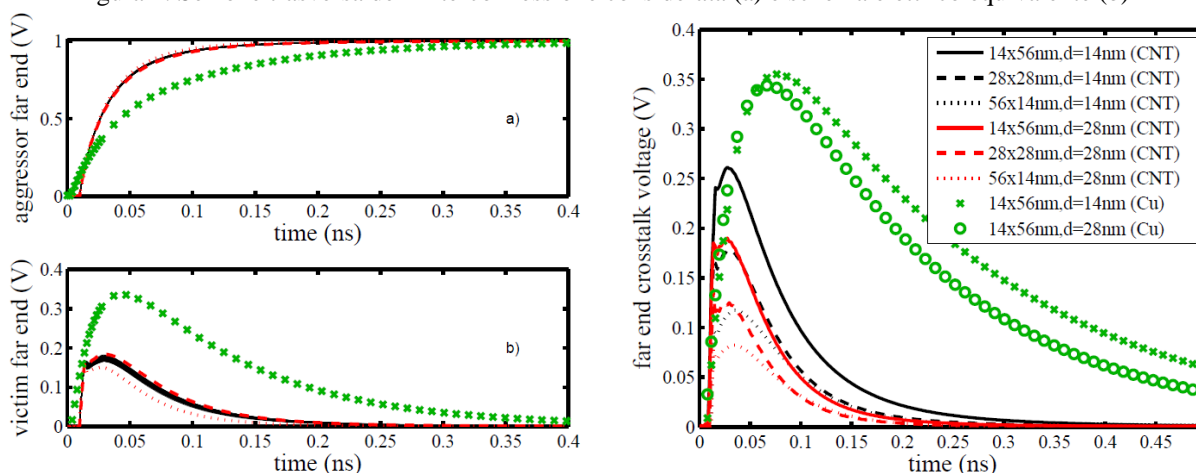


Figura 2. Risposta nel tempo al variare della posizione dei nanotubi nella sezione trasversa: segnale trasmesso (a) e crosstalk (b). Crosstalk al variare del rapporto d'aspetto della sezione trasversa.

[1] Int. Tech. Roadmap for Semiconductors, 2008, <http://public.itrs.ne>.  
 [2] A. Giustiniani, V. Tucci, W. Zamboni, "Modelling Issues and Performance Analysis of High Speed Interconnects Based on a Bundle of SWCNT," *IEEE Trans on Electron Devices*, Vol. 57, No. 8, pp. 1978–86, 2010.  
 [3] A. Giustiniani, V. Tucci, W. Zamboni, "Carbon Nanotubes Bundled Interconnects: Design Hints based on Frequency- and Time-Domain Crosstalk Analyses", *in press on IEEE Trans. On Electron Devices*.  
 [4] B. De Vivo, P. Lamberti, G. Spinelli, V. Tucci, "Reliable bounds for the propagation delay in VLSI nano interconnects based on Multi Wall Carbon Nano Tubes" , *Proc. of SPI*, May 2010, Hildesheim (Germany).  
 [5] P. Lamberti and V. Tucci: "Impact of the Variability of the Process Parameters on CNT-based Nanointerconnects Performances: a Comparison Between SWCNTs Bundles and MWCNT", *submitted to IEEE Transaction on Nanotechnology*.  
 [6] P. Lamberti, M. S. Sarto, A. Tamburrano and V. Tucci: "Robust design of high speed interconnects based on MWCNT", *submitted to IEEE Transaction on Electron Device*.