

MODELLO A LINEA DI TRASMISSIONE MULTICONDOTTORE PER L'ANALISI DI FASCI DI NANOTUBI AL CARBONIO

A. Maffucci¹, G. Miano², F. Villone¹

¹DAEIMI, Università di Cassino, Via Di Biasio 43, 03043 Cassino (FR)

²DIEL, Università Federico II di Napoli, Via Claudio 21, 80125, Napoli

Nella miniaturizzazione su scala nanometrica delle interconnessioni realizzate con materiali convenzionali quali il rame si prevedono problemi legati ai fenomeni di elettromigrazione, tali da non poter garantire le prestazioni richieste dalla roadmap dei semiconduttori [1]. I nanotubi al carbonio (CN) sono materiali recentemente scoperti [2], proposti come alternativa alla tecnologia convenzionale per la realizzazione di componenti nano-elettronici, quali transistor, antenne, filtri ed interconnessioni, in virtù delle loro interessanti proprietà in termini di densità di corrente massima, conducibilità termica e libero cammino medio [3]. Per tale ragione l'analisi delle prestazioni delle interconnessioni realizzate con CN è oggetto di attenzione nella recente letteratura [4].

Gli Autori hanno proposto un modello per la descrizione del trasporto degli elettroni di conduzione dei CN basato sull'idea di considerarli come un fluido confinato sulla superficie cilindrica dei CN [5]. Linearizzando il modello a fluido compressibile descritto dall'equazione di Eulero e utilizzando l'equazione di continuità si ottiene il modello descrittivo della propagazione per un singolo CN:

$$\frac{\partial j}{\partial t} = -c_s^2 \frac{\partial \sigma}{\partial z} - \frac{en_0}{m_e} e_z - v j, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial z}. \quad (1)$$

dove e_z è la componente tangenziale del campo elettrico sulla superficie del CN, σ e j le densità superficiali di carica e di corrente, v è la frequenza di collisioni, c_s la velocità delle onde di pressione, e la carica degli elettroni, m_e la loro massa efficace e n_0 la loro densità. Il modello completo si ottiene accoppiando le (1) con le equazioni di Maxwell. Tale approccio semiclassico include gli effetti quantistici presenti a tali scale dimensionali attraverso m_e .

Da tale modello è stato derivato un modello a linea di trasmissione singola [6] e, recentemente anche un modello TL multicondotto, in considerazione del fatto che i valori di resistenza del singolo CN (dell'ordine dei $k\Omega$) rendono realistico proporre un intero fascio di CN come interconnessione, piuttosto che il singolo CN [7]. La propagazione del segnale elettrico lungo un fascio di CN può essere modellata attraverso un semplice modello a linea RLC, con le matrici dei parametri p.u.l. date da:

$$L = \left(I + \frac{1}{C_Q} C_E \right)^{-1} (L_M + L_K I), \quad R = v_c L_K \left(I + \frac{1}{C_Q} C_E \right)^{-1}, \quad C = C_E, \quad (2)$$

dove L_M e C_E sono rispettivamente le matrici di induttanza magnetica e di capacità elettrostatica p.u.l., mentre l'induttanza cinetica e la capacità quantistica sono date da:

$$L_K = \frac{m_{eff}}{2\pi r_c n_0 e^2} = \frac{h}{8e^2 v_F}, \quad C_Q = \frac{1}{L_K c_s^2} = \frac{8e^2}{h v_F}. \quad (3)$$

dove $v_F \approx c_s$ è la velocità di Fermi ed h è la costante di Planck.

Utilizzando questo modello si è dapprima verificata la legge di scala comunemente utilizzata in letteratura, secondo la quale in un bundle di n CN, l'induttanza e la resistenza p.u.l. scalano come n , rispetto agli stessi parametri valutati per il singolo CN. La figura 1 mostra l'andamento dell'auto e mutua ammettenza di una linea costituita da circa 100 CN, ottenuta risolvendo rigorosamente il modello a linea (2) e approssimando con la suddetta legge di scala i valori di induttanza e resistenza.

Considerando poi un semplice sistema di trasmissione di segnali con driver, linea e capacità di carico, si sono confrontate le prestazioni di una linea a fascio di CN con una di rame di dimensioni

equivalenti. La tecnologia simulata prevede una traccia di segnale di larghezza $w = 27$ nm. La Figura 2 riporta il rapporto tra il tempo di ritardo introdotto dalla linea in rame e quello introdotto dalla linea con CN, a livello locale ed intermedio. Le prestazioni dei CN risultano essere migliori, anche se fortemente condizionate dal numero di CN metallici effettivamente presenti nel bundle.

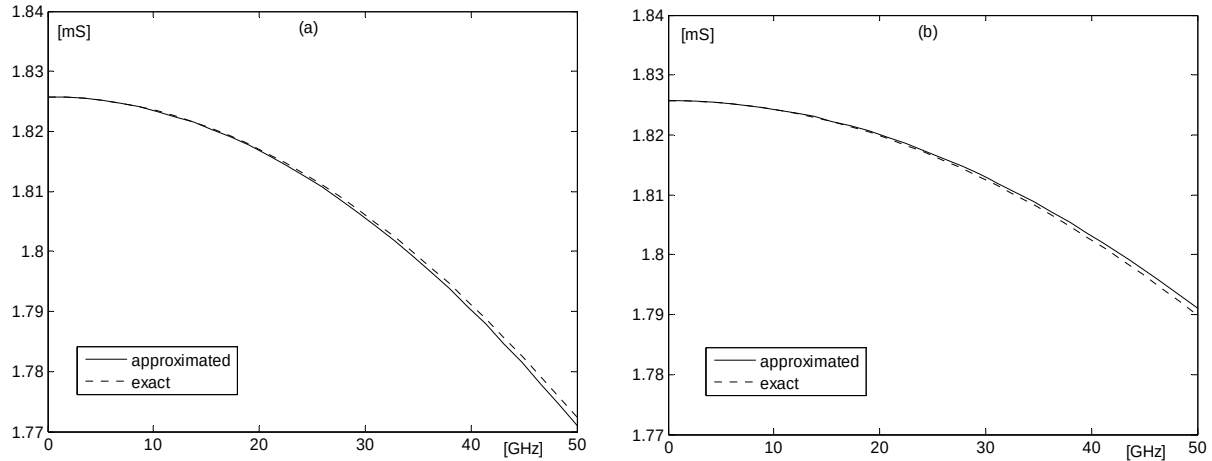


Figura 1. Modulo dell'auto (a) e mutua (b) ammettenza per un fascio di $n = 100$ CN: confronto tra soluzione esatta e soluzione approssimata supponendo una scalatura di L ed R come $1/n$.

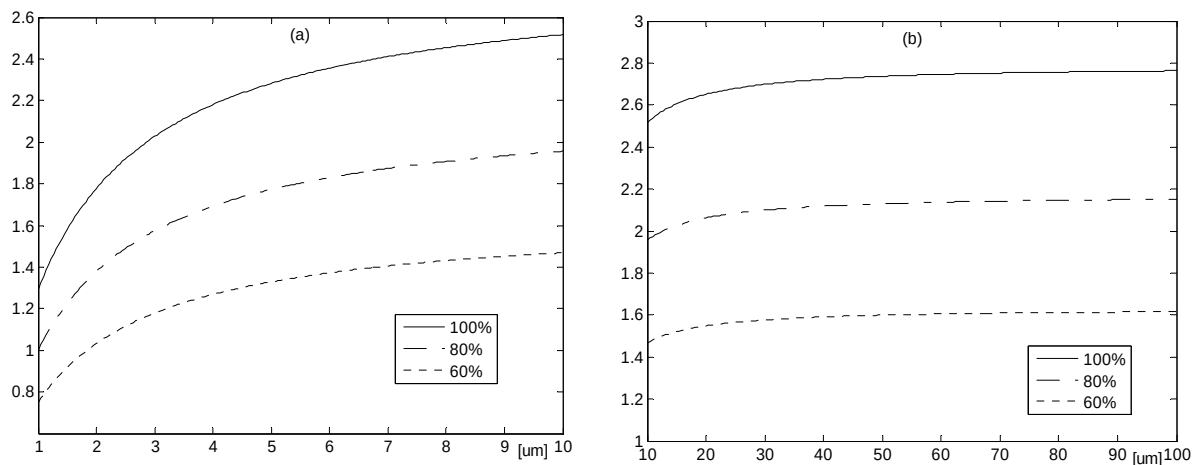


Figura 2. Rapporto tra ritardo introdotto da una linea in rame e da una linea con fascio di CN, al variare del numero di CN metallici nel fascio: (a) livello locale; (b) livello intermedio.

REFERENZE

- [1] International Technology Roadmap For Semiconductors, Edition 2005, <http://public.itrs.net>
- [2] S. Iijima, "Helical Microtubules of Graphitic Carbon", *Nature*, Vol.354, pp.56-58, 1991.
- [3] P. Avouris, J. Appenzeller, R. Marte, S. J. Wind, "Carbon Nanotube Electronics", *Proceedings of IEEE*, Vol. 91, No. 11, pp. 1772-1784, 2003.
- [4] P. J. Burke, "Luttinger liquid theory as a model of the gigahertz electrical properties of carbon nanotubes", *IEEE Trans. Nanotechnology*, Vol.1, pp.129-144, 2002.
- [5] G. Miano, F. Villone, "An Integral Formulation for the Electrodynamics of Metallic Carbon Nanotubes Based on a Fluid Model", *IEEE Trans. Antennas and Prop.*, 54, pp.2713-2724, 2006.
- [6] A. Maffucci, G. Miano, F. Villone, "A transmission line model for metallic carbon nanotube interconnects", *Intern. Journal of Circuit Theory and Applications*, Vol. 35, 2007.
- [7] A. Maffucci, G. Miano, F. Villone, "Performance Comparison Between Metallic Carbon Nanotube and Copper Nano-interconnects", sottomesso a *IEEE Trans. on Advanced Packaging*.