

CONFRONTO TRA I PARAMETRI DI PROPAGAZIONE DI NANO-INTERCONNESSIONI CONVENZIONALI ED INNOVATIVE

A. Maffucci¹, G. Miano², G. Rubinacci², A. Tamburrino¹, F. Villone¹

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

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

La realizzazione delle prossime generazioni di sistemi elettronici veloci e compatti è fortemente condizionata dalla possibilità di ridurre le dimensioni delle interconnessioni a scale nanometriche senza subire un degrado inaccettabile delle prestazioni, in termini di latenza, banda e dissipazione.

I limiti dell'attuale tecnologia basata sul rame sono legati all'insorgenza di fenomeni quali l'elettromigrazione, per effetto dei quali ad esempio la resistenza per unità di lunghezza diventa [1]

$$\rho = \rho_s + \rho_g, \quad \rho_s = \rho_0 \left[1 + \frac{3}{10} \frac{l_0}{w} \right], \quad \rho_g = 3\rho_0 \left[\frac{1}{3} - \frac{\alpha}{2} + \alpha^2 - \alpha^3 \ln \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right] \quad (1)$$

dove $\rho_0 = 1.7 \mu\Omega \cdot cm$ è la resistività bulk, l_0 è il libero cammino medio degli elettroni, w è la larghezza della pista ed il parametro $\alpha \approx 0.5l_0 / w$. Per valori di w al di sotto delle centinaia di nm, il valore di resistività inizia a crescere in maniera significativa rispetto al valore ρ_0 [2].

Una possibile alternativa al rame è data dai nanotubi al carbonio (CN), che presentano interessanti proprietà in termini di densità di corrente massima, conducibilità termica e libero cammino medio [2]. Come per le interconnessioni convenzionali in rame, la propagazione lungo tali strutture può essere descritta da un semplice modello a linea di trasmissione RLC [3]. Un fascio di CN è descrivibile da un modello a linea di trasmissione multiconduttore con matrici di parametri per unità di lunghezza:

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

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 è la velocità di Fermi, h è la costante di Planck e v_c è la frequenza di collisioni.

Accanto a queste due tipologie di interconnessioni elettriche, sono state proposte due ulteriori nanointerconnessioni ottiche. La prima tipologia si basa sulla possibilità di trasportare la luce lungo catene di nano-particelle metalliche (NP), sfruttando l'accoppiamento di campo vicino tra le oscillazioni plasmoniche [4]. La seconda tipologia invece si basa sull'utilizzo di superfici metalliche come guide d'onda sfruttando la possibilità di innescare onde superficiali plasmoniche (*surface plasmon-polariton*, SPP) [5]. In entrambi i casi la differenza rispetto alle fibre ottiche convenzionali risiede nella possibilità di confinare il campo trasversalmente per distanze un ordine di grandezza inferiori, riducendo la diffusione ottica ed aumentando la densità della circuiteria ottica.

Il punto di partenza comune per l'analisi delle due strutture è l'espressione della costante dielettrica di un metallo a frequenze ottiche (modello di Drude):

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu)} \right] \quad (3)$$

dove ε_0 è la costante dielettrica nel vuoto, mentre ω_p è la frequenza di plasma e ν la frequenza di scattering degli elettroni di conduzione. Nei metalli $\nu \ll \omega_p$, quindi $\text{Re}\{\varepsilon(\omega)\} < 0$ per $\omega < \omega_p$.

Con riferimento alle interconnessioni NP, assumendo l'eccitazione di un'onda incidente con polarizzazione trasversale o longitudinale, la relazione di dispersione è data da [6]

$$\operatorname{Re}\{\alpha(\omega)\} + 2\eta\left(\frac{a}{d}\right)^3 \cos\beta(\omega) = 0, \quad \alpha(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega) + 2\varepsilon_0\varepsilon_r}{\varepsilon(\omega) - \varepsilon_0\varepsilon_r}, \quad (4)$$

dove $\eta = 1$ e $\eta = -2$ rispettivamente per polarizzazione trasversale o longitudinale.

Per le interconnessioni SPP invece si può derivare la seguente relazione

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\varepsilon(\omega)\varepsilon_0\varepsilon_r}{\varepsilon(\omega) - \varepsilon_0\varepsilon_r}. \quad (5)$$

In figura 1(a) si mostra il ritardo introdotto dalle 4 diverse interconnessioni, con riferimento ad una stripline realizzata nella tecnologia dei 22 nm. I ritardi associati alle interconnessioni plasmoniche derivano dalla valutazione della velocità di gruppo dalle relazioni (4) e (5). Il caso CN si riferisce ad un fascio di 12 x 24 CN, il caso NP fa riferimento ad un fascio di 3 x 6 array di particelle di oro, mentre la linea SPP è realizzata in argento. Le interconnessioni CN hanno prestazioni migliori di quelle convenzionali, mentre quelle ottiche presentano performance molto migliori di quelle elettriche. Si tratta comunque di un caso ideale, avendo trascurato in questa prima analisi gli effetti di degrado dovuti alle necessarie trasduzioni elettro/optiche del segnale. Un ulteriore parametro di propagazione significativo è la lunghezza di decadimento. La figura 1b mostra l'andamento di tale parametro per le interconnessioni ottiche analizzate in precedenza. La SPP è adatta per il livello intermedio nel range basso di frequenze ottiche, mentre la NP richiede l'utilizzo di ripetitori.

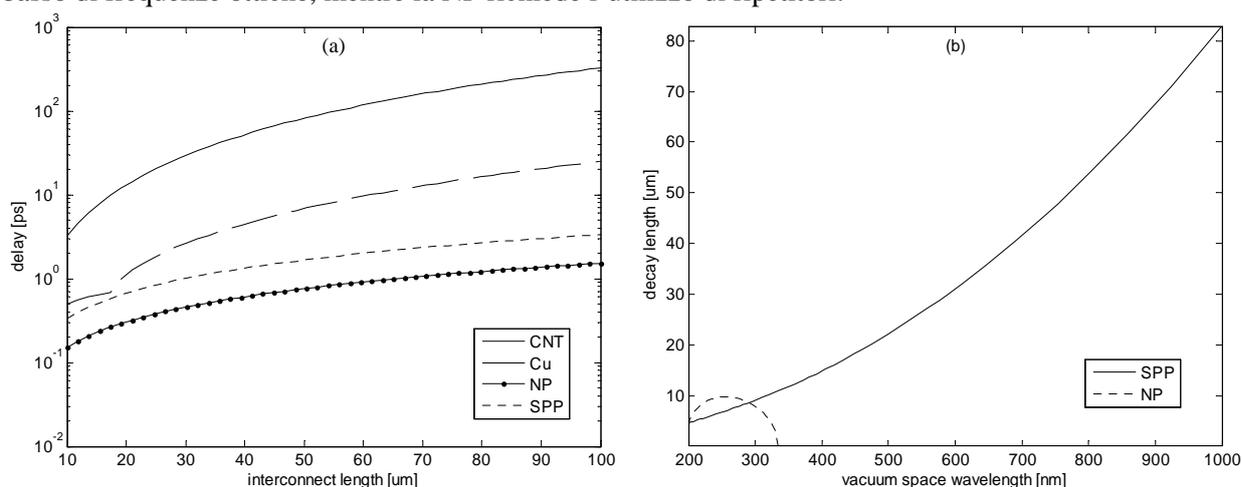


Figura 1. Confronto tra parametri di propagazione di interconnessioni convenzionali ed innovative: (a) ritardo; (b) lunghezza di decadimento.

REFERENZE

- [1] P. Kapur, et al., "Technology and reliability constrained future copper interconnects—Part I: Resistance modeling," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 49, pp. 590–597, Apr. 2002.
- [2] International Technology Roadmap For Semiconductors, Edition 2005, <http://public.itrs.net>
- [3] A. Maffucci, G. Miano, F.Villone, "A transmission line model for metallic carbon nanotube interconnects", *Intern. Journal of Circuit Theory and Applicat.*, Vol. 36, no. 1, pp.31-51, 2008.
- [4] S. A. Mayer, et al., "Observation of near-field coupling in metal nanoparticle chains using far-field polarization spectroscopy", *Phys. Rev. B* 65, 193408, 2002.
- [5] Jung Jin Ju, et al., "40 Gbit/s light signal transmission in long-range surface plasmon waveguides", *Applied Physics Letter*, 91, 171117, 2007.
- [6] A. Maffucci, G. Miano, G. Rubinacci, A. Tamburrino, F.Villone, "Plasmonic, Carbon Nanotube and Conventional nano-interconnects: a comparison of propagation properties", proc. of *SPI, Workshop on Signal Propagation on Interconnects*, maggio 2008, Avignone, Francia.