

CIRCUITO EQUIVALENTE E PROPRIETA' DI DISPERSIONE DI NANOGUIDE AL GRAFENE

Giampiero Lovat, Rodolfo Araneo

Sezione di Ingegneria Elettrica
Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

Il grafene è la versione bidimensionale della grafite e uno dei materiali più promettenti per le future applicazioni micro- e nano-tecnologiche [1]. Fondamentalmente, il grafene è costituito da uno strato di atomi di carbonio disposti in un reticolo esagonale. Solo recentemente è stato possibile isolare dei singoli strati di grafene: da allora molti gruppi di ricerca in tutto il mondo stanno lavorando per un rapido sviluppo di questa tecnologia [2].

Dal punto di vista elettronico, il grafene è un semiconduttore a zero bandgap la cui conducibilità può essere controllata per mezzo di campi elettrostatici e/o magnetostatici attraverso, rispettivamente, gli effetti di campo elettrico e l'effetto Hall [3], [4]; tuttavia, rispetto ad altri metalli di spessore atomico, il grafene è termodinamicamente stabile e possiede una conducibilità minima anche nel limite di concentrazione di portatori nulla [5].

Dal punto di vista elettromagnetico, il grafene può essere descritto come uno strato conduttivo di spessore infinitesimo e caratterizzato dunque da una conducibilità superficiale. Un modello matematico per tale conducibilità può essere ottenuto attraverso un approccio quanto-elettrodinamico e può tener conto di alimentazioni sia elettrostatiche sia magnetostatiche [6]. In particolare, in presenza di entrambi i campi, la conducibilità del grafene deve essere descritta da un tensore di conducibilità piuttosto che da una quantità puramente scalare [7]. Inoltre, a partire dalle frequenze dell'ordine dei terahertz, possono insorgere importanti effetti di dispersione spaziale che richiedono, per una loro corretta descrizione, un modello tensoriale anche in assenza di campi statici di alimentazione [8].

Partendo dalle equazioni di Maxwell e dal modello tensoriale della conducibilità del grafene, è stato derivato il circuito equivalente da utilizzare nel classico modello a linea di trasmissione per l'analisi dell'efficienza di schermatura di schermi planari [9]. Tale circuito equivalente può essere facilmente utilizzato per studiare le proprietà di schermatura del grafene sotto incidenza di onda piana in differenti configurazioni: in assenza di campi statici, in presenza di un campo elettrostatico e/o di un campo magnetostatico, tenendo conto della dispersione spaziale e infine anche in presenza di strutture multistrato di supporto di spessori nanometrici [9]. Inoltre il circuito equivalente derivato permette di studiare facilmente le proprietà di dispersione in frequenza dei modi dominanti supportati da diverse nanoguide bidimensionali al grafene, ricavando così le costanti di fase e di attenuazione, i relativi campi modali delle suddette nanoguide, valutare gli effetti del possibile cambiamento di conducibilità per mezzo di alimentazioni esterne o drogaggio interno e, infine, mostrare gli effetti di dispersione spaziale [10]-[11]. In particolare, la dispersione spaziale presente nel grafene è stata studiata in profondità, mostrando come la sua inclusione in un modello di conducibilità è cruciale per ottenere dei risultati corretti per strutture guidanti tridimensionali, come ad esempio la nanostriscia di grafene (o "graphene nanoribbon", GNR) [12]-[17]. Ciò permette di delineare le potenzialità delle nanoguide in grafene per future applicazioni in nanoelettromagnetismo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Geim e K. S. Novoselov, "The rise of graphene", *Nature Materials*, **6** (2007).
- [2] A. K. Geim, "Graphene: Status and prospects", *Science*, **324** (2009).
- [3] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva e A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films", *Science*, **306** (2004).
- [4] Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer e P. Kim, "Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene", *Nature*, **438** (2005).
- [5] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos e A. A. Firsov, "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene", *Nature*, **438** (2005).
- [6] M. Dressel e G. Grüner, *Electrodynamics of Solids*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2002.
- [7] V. P. Gusynin, S. G. Sharapov e J. P. Carbotte, "Magneto-optical conductivity in graphene", *Journal of Physics: Condensed Matter*, **19** (2007).
- [8] G. W. Hanson, "Dyadic Green's functions for an anisotropic non-local model of biased graphene", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **56** (2008).
- [9] G. Lovat, "Equivalent circuit for electromagnetic interaction and transmission through graphene sheets", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **54** (2012).
- [10] G. Lovat, "Transverse-resonance analysis of dominant-mode propagation in graphene nano-waveguides", *Proc. 2012 IEEE EMC Europe*, Roma, settembre 2012.
- [11] G. Lovat, P. Burghignoli e R. Araneo, "Low-frequency dominant-mode propagation in spatially-dispersive graphene nanowaveguides", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **55** (2013).
- [12] R. Araneo, G. Lovat e P. Burghignoli, "Graphene nanostrip lines: Dispersion and attenuation analysis", *Proc. 16th IEEE Workshop on Signal and Power Integrity*, Sorrento, maggio 2012.
- [13] R. Araneo, G. Lovat e P. Burghignoli, "Dispersion analysis of graphene nanostrip lines" *Digest 2012 IEEE AP-S*, Chicago, IL, luglio 2012.
- [14] G. Lovat, G. W. Hanson, R. Araneo e P. Burghignoli, "Semiclassical spatially dispersive intraband conductivity tensor and quantum capacitance of graphene", *Phys. Rev. B*, **87** (2013).
- [15] G. Lovat, G. Hanson, R. Araneo, P. Burghignoli, "Comparison of Spatially Dispersive Models for Dyadic Interband Conductivity of Graphene", *Proceeding of EuCAP 2013 - European Conference on Antennas and Propagation*, April 8-12, 2013, Gothenburg (Sweden).
- [16] G. Lovat, R. Araneo, "Non-Local Models and Effects in Graphene Nano-interconnects", *Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2013)*, Brugge, Belgium, September 2-6, 2013.
- [17] P. Burghignoli, R. Araneo, G. Lovat, G. Hanson, "Space-Domain Method of Moments for Graphene Nanoribbons", *Proc. of EuCAP 2014 - European Conference on Antennas and Propagation*, The Hague, The Netherlands, April 6-11, 2014.