

UN'ANALISI FULL-WAVE DI UNA CLASSE DI INDUTTORI PLANARI A SPIRALE REALIZZATI SU SUBSTRATI DIELETTRICI DI DIMENSIONI FINITE

Diego CARATELLI, Renato CICCHETTI

Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Elettronica,
Via Eudossiana 18, 00184 Roma

Fax: +39-06-4742647, E-mail: cicchetti@die.uniroma1.it

Abstract

A full-wave FDTD analysis of a class of planar rectangular and circular spiral inductors is presented. To accurately model the inductor geometries a locally conformal FDTD scheme is adopted. Using the FDTD algorithm, the circuital behavior and the spurious emission of some spiral inductors, realized on a substrate of infinite/finite dimensions, are investigated. The numerical results show that the circuital performances and the level of the radiated emission are significantly influenced by the component's geometry and its location with respect to the substrate truncation.

1. INTRODUZIONE

Gli induttori planari a spirale sono largamente impiegati, nelle applicazioni concernenti i moderni sistemi di comunicazione wireless, per realizzare circuiti integrati a radiofrequenza (RF) e di tipo monolitico a microonde (MMIC), di cui sono esempi gli amplificatori a basso rumore, gli oscillatori controllati in tensione, gli induttori attivi ecc. L'incremento del livello di integrazione che caratterizza tali applicazioni richiede la predizione degli effetti parassiti causati dalla sempre maggiore densità dei componenti realizzati sul medesimo substrato. Inoltre, l'incremento della frequenza di lavoro causa fenomeni indesiderati (accoppiamento parassita, distorsione del segnale, emissione, ecc.), i quali sono responsabili di una riduzione delle prestazioni. Pertanto, la predizione del comportamento circuitale e dell'emissione spuria è un importante aspetto di cui tenere conto nella fase di progetto.

In anni recenti, alcuni autori hanno analizzato le caratteristiche circuitali di induttori a spirale [1]-[3], trascurando tuttavia gli aspetti EMC/EMI. Questi ultimi sono importanti poiché la predizione e la conseguente riduzione di possibili problemi EMI direttamente nella fase di progetto può ridurre i tempi necessari all'ottenimento di un prodotto affidabile rispondente alle specifiche [4]-[5]. A tale scopo risulta utile l'adozione di idonee tecniche di predizione di tipo full-wave.

In questa memoria, un modello di tipo full-wave, basato sulla tecnica FDTD, viene utilizzato per analizzare le prestazioni elettromagnetiche di una classe di induttori planari. Le informazioni così ottenute possono essere utilmente utilizzate per ottimizzare il progetto di tali componenti.

2. LO SCHEMA FDTD LOCALMENTE CONFORME

Il modello adottato per predire le caratteristiche elettromagnetiche degli induttori planari presi in considerazione è basata su di uno schema FDTD localmente conforme [6]. Tale schema permette di effettuare analisi elettromagnetiche con un grado di accuratezza numerica superiore a quello ottenibile mediante la tecnica FDTD convenzionale, basata sullo schema di Yee utilizzando un'approssimazione staircase delle strutture metalliche. In particolare, l'adozione dello schema suddetto ha permesso di analizzare induttori a spirale circolare dotati di via hole di tipo sia rettangolare che cilindrico.

3. RISULTATI NUMERICI

Al fine di validare il codice FDTD sviluppato sono state analizzate una serie di strutture elettromagnetiche di cui viene proposto, per brevità, un solo esempio numerico.

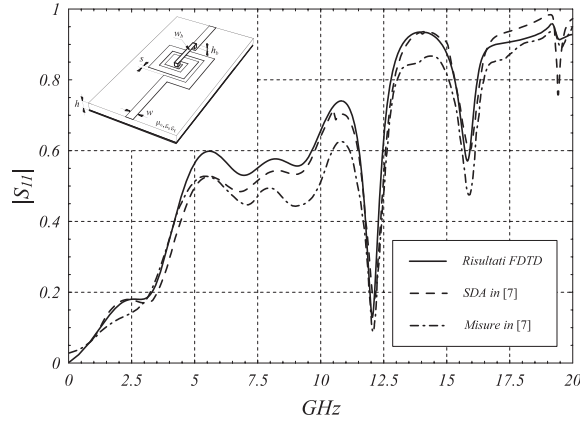


Fig.1. Modulo del parametro di scattering S_{11} in funzione della frequenza. Caratteristiche della struttura: $w=625\mu\text{m}$, $s=312.5\mu\text{m}$, $w_b=312.5\mu\text{m}$, $h_b=317.5\mu\text{m}$, $h=635\mu\text{m}$, $\epsilon_r=9.8$.

La struttura presa in considerazione è costituita dall'induttore planare a spirale rettangolare analizzato in [7] mediante la tecnica basata sullo *Spectral Domain Approach* (SDA). L'induttore si compone di due spire metalliche, aventi larghezza $w=625\mu\text{m}$, separate da un gap $s=312.5\mu\text{m}$ e stampate su di un substrato in allumina dello spessore $h=635\mu\text{m}$ dotato di una costante dielettrica relativa $\epsilon_r=9.8$.

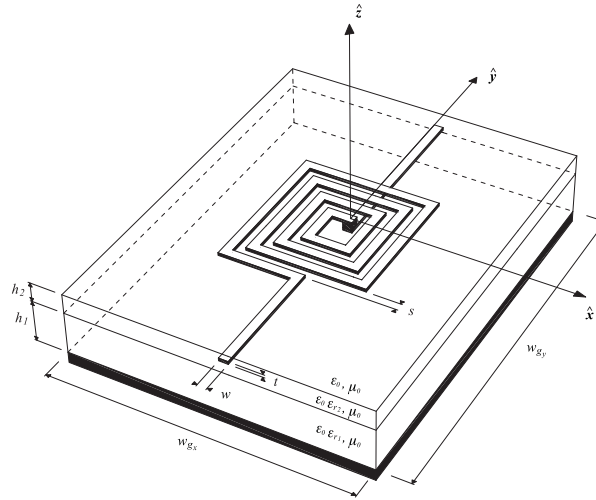


Fig. 2. Geometria dell'induttore planare a spirale rettangolare. Caratteristiche della struttura: $w=16\mu\text{m}$, $t=5\mu\text{m}$, $s=14\mu\text{m}$, $h_1=75\mu\text{m}$, $h_2=35\mu\text{m}$, $w_{gs}=0.636\text{mm}$, $w_{gy}=0.732\text{mm}$, $\epsilon_{r_1}=12.9$, $\epsilon_{r_2}=3.2$.

In Fig. 1, viene riportato il confronto tra il parametro di scattering S_{11} della struttura summenzionata valutato sia per mezzo della tecnica *FDTD* che della tecnica *SDA*. Come si può notare l'accordo sia con la soluzione *SDA* che con le misure sperimentali è buono. La medesima accuratezza numerica è stata ottenuta relativamente agli altri parametri di scattering.

Dopo la validazione numerica del modello è stata condotta l'analisi delle caratteristiche elettriche e dell'emissione spuria in una classe di induttori planari a spirale. A titolo di esempio viene riportata, in Fig. 2, una delle strutture analizzate, consistente in un induttore a spirale rettangolare realizzato con 3.5 spire su di un substrato dielettrico in *GaAs* ($\epsilon_{r_1}=12.9$) di spessore $h_1=75\mu\text{m}$, dotato di un superstrato in poliammide ($\epsilon_{r_2}=3.2$) avente

uno spessore $h_2=35\mu m$. Le dimensioni del piano di massa sono $w_{g_x}=0.636mm$ e $w_{g_y}=0.732mm$.

Nella realizzazione dell'induttore sono stati utilizzati due livelli di metallizzazione. Il primo, posto su di uno strato di poliammide dello spessore di $5\mu m$, connette la spira più interna dell'induttore alla linea di uscita attraverso un via hole. Il secondo livello di metallizzazione è posto invece su di uno strato di poliammide dello spessore di $15\mu m$ ed è posizionato ad una distanza di $0.2mm$ dal troncamento del substrato dielettrico. Lo spessore complessivo dello strato di poliammide presente al disotto della spirale è di circa $20\mu m$. Le tracce metalliche sono caratterizzate da una larghezza $w=16\mu m$, uno spessore $t=5\mu m$ e sono separate da un gap $s=14\mu m$.

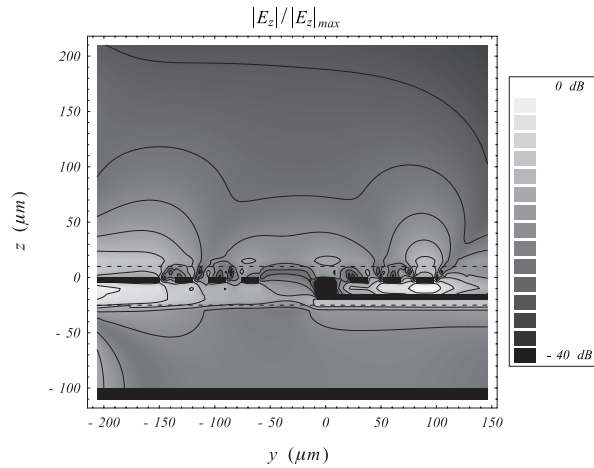


Fig. 3. Modulo della componente z del campo elettrico normalizzato in corrispondenza del piano yz . Frequenza $f=22GHz$. I parametri della struttura coincidono con quelli riportati in Fig. 2.

Dall'analisi del parametro di scattering S_{11} si evince che la struttura presenta un carattere induttivo in un intervallo di frequenze di circa $30GHz$. Dall'analisi della medesima figura emerge inoltre che la struttura realizzata su di un substrato finito presenta, come era da attendersi, prestazioni circuitali inferiori a quelle che caratterizzano l'analoga struttura stampata su di un substrato infinito. Tale comportamento può essere imputato ai fenomeni diffrattivi che hanno luogo in corrispondenza del troncamento del substrato.

In Fig. 3, è riportata una mappa di campo relativa al modulo della componente z del campo elettrico normalizzato, valutato alla frequenza $f=22GHz$, in corrispondenza del piano verticale (piano yz), che taglia la suddetta struttura lungo le relative linee di adduzione. La mappa permette di apprezzare il comportamento singolare del campo in corrispondenza dei bordi delle tracce metalliche, la perturbazione del campo indotta dalla presenza del via hole, nonché il forte accoppiamento elettromagnetico tra la spirale metallica e la linea di uscita. Tali perturbazioni determinano l'insorgere di fenomeni di emissione ed, allo stesso tempo, producono una riduzione delle prestazioni circuitali dovute all'immagazzinamento di energia reattiva localizzato nella regione compresa tra la spirale metallica e la linea di uscita. La medesima figura mostra la conversione modale del campo guidato dalla linea d'ingresso in onde di volume aventi carattere sferico.

In Fig. 4 sono infine riportati i diagrammi, a frequenza $f=22GHz$, dell'intensità di radiazione normalizzata U/U_{max} , nella regione di campo lontano. In particolare, in corrispondenza del piano $\phi=90^\circ$ (piano yz) è possibile osservare un forte processo emissivo che interessa anche la regione di spazio sottostante lo schermo metallico, conseguenza della riflessione del campo elettromagnetico guidato dalla linea di ingresso in corrispondenza dell'induttore.

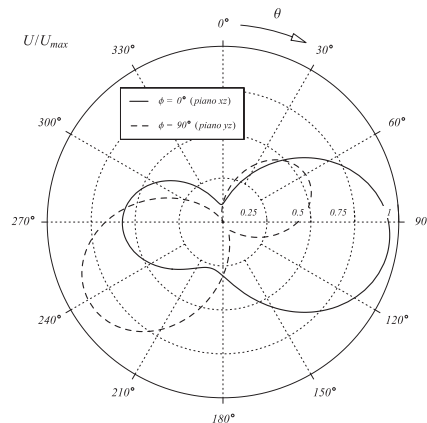


Fig. 4. Diagrammi dell'intensità di radiazione normalizzata. Frequenza $f = 22 \text{ GHz}$. I parametri della struttura coincidono con quelli riportati in Fig. 2.

Inoltre, si osserva un interessante effetto emissivo relato alla natura di onda viaggiante propria del modo eccitato lungo la linea di uscita. Ciò dà luogo ad un lobo di radiazione inclinato rispetto alla direzione longitudinale. Tale effetto è potenzialmente in grado di produrre interferenze indesiderate con circuiti o dispositivi posti nelle immediate vicinanze. Infine, è interessante notare come il diagramma di radiazione nel piano $\phi = 0^\circ$ (piano xz) rifletta l'asimmetria geometrica della spirale metallica in tale piano (vedi Fig. 2).

4. CONCLUSIONI

In questa memoria sono state analizzate le prestazioni di una classe di induttori planari a spirale rettangolare e circolare realizzati su substrati dielettrici di dimensioni finite. Il modello di analisi adottato impiega uno schema *FDTD* localmente conforme al fine di valutare la distribuzione del campo elettromagnetico con un elevato grado di accuratezza. I risultati numerici presentati evidenziano come la distribuzione del campo e le caratteristiche degli induttori siano significativamente influenzate dalla geometria della spirale metallica e dal posizionamento del componente rispetto al troncamento del substrato dielettrico. In particolare, è stato osservato che quest'ultimo, favorendo emissioni spurie, è responsabile sia di una degradazione delle prestazioni circuitali che dell'insorgere di potenziali problemi *EMC/EMI*.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. R. Long, and M. A. Copeland, "The modeling, characterization, and design of monolithic inductors for silicon RF IC's," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 32, pp. 357-369, March 1997.
- [2] R. P. Ribas, J. Lescot, J. Leclercq, J. M. Karam, and F. Ndagijimana, "Micromachined microwave planar spiral inductors and transformers," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 48, pp. 1326-1335, Aug. 2000.
- [3] I. J. Bahl, "High-performance inductors," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 49, pp. 654-664, April 2001.
- [4] R. Cicchetti, and A. Faraone, "A full-wave radiation model for a class of gridded ground interconnecting structures," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, pp. 212-213, Jan. 1999.
- [5] R. Cicchetti, and G. Cangini, "A time-domain analysis of interconnecting structures operating in short-pulse wave regime," in *Proc. Symp. of XXVI-th General Assembly*, p. 716, University of Toronto, Ontario, Canada, Aug. 1999.
- [6] S. Dey, R. Mitra, and S. Chebolu, "A technique for implementing the FDTD algorithm on a nonorthogonal grid," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 213-215, Mar. 1997.
- [7] T. Becks, and I. Wolff, "Analysis of 3-D metallization structures by a full-wave spectral domain technique," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol. 40, pp. 2219-2227, Dec. 1992.