

RF 螺旋电感参数的提取方法

王彦丰 黄庆安 廖小平

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 射频集成电路 (RFIC) 中电感元件十分重要, 其模型是 RFIC 模拟的关键. 在确定电感的电路模型后, 要进行正确的设计和优化, 还必须知道模型中各元件的参数. 文中首先给出了电感结构的嵌入式和非嵌入式电路模型, 然后从已知的 S 参数通过三种途径提取了模型中集总元件参数, 并对三种途径提取的元件参数进行了模拟, 以便得到提取模型参数的最佳途径.

关键词: 螺旋电感; 嵌入式模型; S 参数

EEACC: 1280; 2560

中图分类号: TN4 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)08-1591-04

1 引言

随着通信系统的发展, 无线系统已经占有巨大市场. 在集成的 RF 收发机中电感的需求越来越大, 尤其是螺旋型电感. 要获得高品质因数 Q 和自谐振频率的螺旋电感, 对其结构的分析和优化变得特别重要. 文献[1~3]已做了较多的工作, 但是, 缺乏简单和精确的元件参数公式, 这对于螺旋电感的设计和优化显然成了主要的障碍之一. 因此, 从已测或模拟的参数中提取简单和精确的元件参数公式, 以预测电感性能参数是十分必要的.

本文首先确定了螺旋电感结构的嵌入式模型和非嵌入式模型, 随后介绍了从模拟的 S 参数提取模型中元件参数的三种途径: (1) 根据传输线理论从 S 参数获得传输常数和特征阻抗; (2) 直接由 S 参数获得 A 矩阵参数; (3) 直接由 S 参数获得 Y 参数. 对提取参数的模拟结果进行了分析和比较, 得出优化结构性能最简单和精确的参数提取方法.

2 RF 螺旋电感的模型

精确的物理模型的建立关键在于是否能体现相

关寄生和其他效应等, 如涡电流效应、趋肤效应. 理想的电感只是存储磁能, 而真实的电感存在着寄生电阻和寄生电容, 寄生电阻通过欧姆损耗消耗能量, 而寄生电容存贮电能. 集成螺旋电感的物理模型等效电路如图 1 所示, 虚线框内是非嵌入式模型, 考虑压焊块在内为嵌入式模型. 电感值 L_s 、串联电阻 R_s 、电感结构和其下面引回线间的电容 C_s 、电感结构和衬底之间的电容 C_{ox} 、电感结构下衬底等效电阻 R_{si} 和电容 C_{si} 的计算公式见文献[4], 压焊块和衬底间的电容 C_{sipad} 、压焊块下衬底等效电阻 R_{sipad} 和电容 C_{sipad} 的计算公式如下

$$C_{oxpad} = \frac{1}{2} a^2 \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (1)$$

$$C_{sipad} = \frac{1}{2} a^2 C_{sub} \quad (2)$$

$$R_{sipad} = \frac{2}{a^2 G_{sub}} \quad (3)$$

式中 C_{sub} , G_{sub} 为单位衬底电容和电导; a 为压焊块边长.

图 2 为图 1 的简化模型等效电路. 图中 C_p 和 R_p 也分为两种情况: 在嵌入式模型中与 C_{ox} , C_{oxpad} , C_{si} , C_{sipad} , R_s 和 R_{sipad} 有关; 在非嵌入式模型中与 C_{ox} , C_{si} 和 R_{si} 有关, 其计算公式见文献[5].

王彦丰 男, 1977 年出生, 硕士研究生, 主要从事 MEMS RF 器件和 RF 电路的设计.

黄庆安 男, 1963 年出生, 博士生导师, 主要从事 MEMS 器件和系统的研究.

廖小平 男, 1966 年出生, 硕士生导师, 主要从事 MEMS RF 器件和系统的研究.

2004-10-14 收到, 2005-04-05 定稿

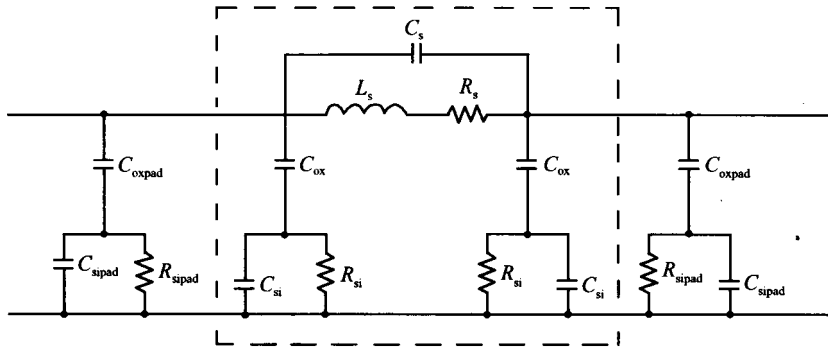


图 1 螺旋电感模型的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit model of spiral inductor

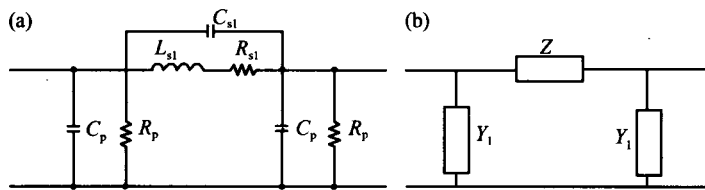


图 2 螺旋电感模型的简化等效电路

Fig. 2 Simple equivalent circuit model of spiral inductor

3 模型参数提取方法

为了优化设计电感结构,获得高性能电感,提取精确的电感模型的元件参数十分必要.下面介绍三种提取模型元件参数的途径:

(1) S 参数 A 矩阵参数 传播常数、特征阻抗 Z_0 R_s, L_s, R_p 和 C_p

由 A 矩阵可得到 l 和 Z_0 ,从而根据传输线理论得到各元件参数.

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{ch } l & Z_0 \cdot \text{sh } l \\ \text{sh } l / Z_0 & \text{ch } l \end{vmatrix} \quad (4)$$

式中 l 为电感结构的长度,由(4)式可得

$$l = \ln(A + \sqrt{BC}) \quad (5)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{B}{C}} \quad (6)$$

根据传输线理论可推导各元件参数如下:

$$\begin{cases} R_s = \text{Re}\{ l \cdot Z_0 \} \\ L_s = \text{Im}\{ l \cdot Z_0 \} / \\ R_p = 1 / \text{Re}\{ l / 2 Z_0 \} \\ C_p = \text{Im}\{ l / 2 Z_0 \} / \end{cases} \quad (7)$$

(2) S 参数 A 矩阵参数 R_s, L_s, R_p 和 C_p

由图 2(b)可直接推导出 A 矩阵参数与模型各

元件参数的关系,再根据模拟所得 S 参数获得模型电路 A 矩阵参数. A 矩阵参数与元件参数的关系式如下:

$$\begin{cases} Z = B \quad R_s + j L_s \\ Y_1 = (A - 1) / B = 1 / R_p + j C_p \end{cases} \quad (8)$$

此处忽略了 C_s ,因为它几乎不随频率变化.然后可提取模型各元件参数.

(3) S 参数 Y 矩阵参数 R_s, L_s, R_p 和 C_p

由图 2(b)可直接推导出 Y 参数与模型各元件参数的关系,再根据模拟所得 S 参数获得模型电路 Y 参数. Y 参数与元件参数的关系式如下:

$$\begin{cases} Y_1 = Y_{11} + Y_{12} = 1 / R_p + j C_p \\ Z = - 1 / Y_{12} \quad R_s + j L_s \end{cases} \quad (9)$$

然后可提取模型各元件参数.

4 模拟结果与分析

为了验证以上提取模型电路各参数,本文以一 6.5 匝的螺旋电感为例,通过三种途径分别提取了各模型参数.螺旋电感材料为铜,线宽 $13\mu\text{m}$,线距 $7\mu\text{m}$,电感结构直径 $300\mu\text{m}$,氧化层厚度 $4.5\mu\text{m}$.应用 ADS 软件对此结构进行了模拟,非嵌入式螺旋电感结构的模拟结果如图 3 所示,嵌入式螺旋电感结构的模拟结果如图 4 所示.

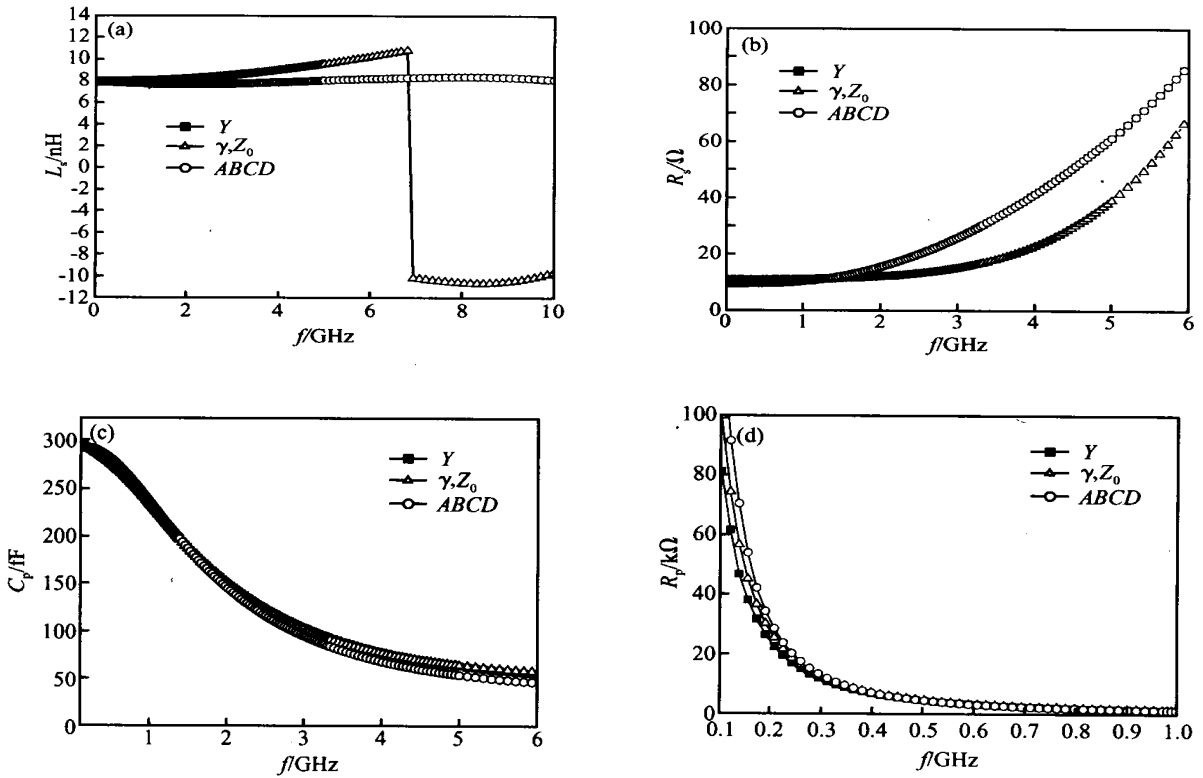


图 3 非嵌入式电感模型元件参数的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of model parameter of de-embed spiral inductor

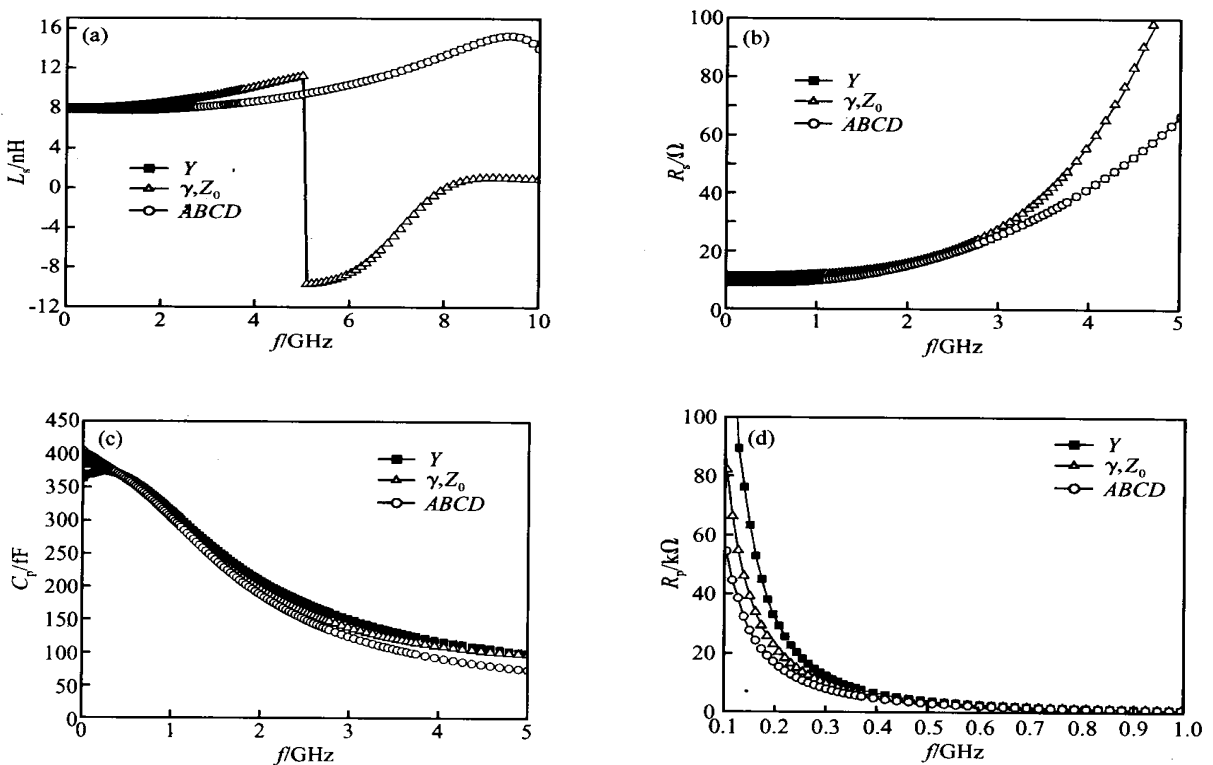


图 4 嵌入式螺旋电感模型元件参数的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of model parameter of embed spiral inductor

从模拟结果可以看出,电感值在某一频段变化不大,但是由不同途径获得的 L_s 从数值上差别较大. 串联电阻 R_s 是电感性能主要抑制因子之一,随着频率的增加,因趋肤效应而增加. 低频时, R_p 数值很大,衬底几乎没有损耗,此时主要损耗由 R_s 决定; 高频时, R_p 变得比较小,成为主要损耗,限制了电感性能. C_p 在低频时主要由 C_{ox} 决定,随着频率的增加,电场穿透衬底, C_p 由 C_{ox} 和 C_{si} 串联决定,所以 C_p 大大降低.

从模拟结果的对比可看出,三种方法获得的模型各参数在特定频段差别不是很大. 要获得精确的元件参数数值,首先要确定应用频段的电感值,这里的应用频段为实际电路中应用的频率带宽,一般比较窄. 由图 3 和 4 可知, R_s , R_p 和 C_p 在一定频段数值也变化不大,若应用频段与此频段恰好重叠时,可直接获得 R_s , R_p 和 C_p ,若不重叠,可取不同频率点解二元方程得到.

5 结论

提取准确的模型参数,为电感结构的设计与优化提供了保障. 基于嵌入式和非嵌入式电感物理模型,从已知 S 参数分别通过三种途径提取了电感物

理模型的元件参数. 通过对三种途径提取的模型元件参数的比较,得出了提取电感物理模型参数的最佳途径,即从模拟或测得的 S 参数转换为 Y 参数,从而提取模型各参数,进而优化电感结构,使其有最好的性能.

参考文献

- [1] Tang W C, Chow Y Y. Inductance formula of a square spiral inductor on grounded substrate by duality and synthetic asymptote. IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig, 2002:2069
- [2] Pieters P, et al. Accurate modeling of high-Q spiral inductors in thin film multilayer technology for wireless telecommunication applications. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2001, 49:589
- [3] Niknejad A M, Meyer R G. Analysis of eddy-current losses over conductive substrates with applications to monolithic inductors and transformers. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2001, 49:166
- [4] Yue C P, Wong S S. Physical modeling of spiral inductors on silicon. IEEE Trans Electron Devices, 2000, 47(3):560
- [5] Yue C P, Wong S S. On-chip spiral inductors with patterned ground shields for Si-based RF ICs. IEEE J Solid-State Circuits, 1998, 33(5):743

Parameters Extraction Methods of an RF Spiral Inductor

Wang Yanfeng, Huang Qing'an, and Liao Xiaoping

(Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An inductor is important in radio frequency integrated circuits (RFIC) and its model is key for RFIC's simulation. First, the lumped circuit models of inductor structures are given. Then, by three approaches, the lumped elements parameters are extracted from the known S parameters. In addition, the extracted elements parameters are simulated and analyzed. The best approach for extracting parameters is achieved through analyzing the results.

Key words: spiral inductor; embed model; S parameters

EEACC: 1280; 2560

Article ID: 0253-4177(2005)08-1591-04

Wang Yanfeng male, was born in 1977, master candidate. He is engaged in research on MEMS RF devices and RF circuits design.

Huang Qing'an male, was born in 1963, adviser of PhD candidates. He is engaged in research on MEMS devices and systems.

Liao Xiaoping male, was born in 1966, adviser of master candidates. He is engaged in research on MEMS RF devices and RF circuit systems.

Received 14 October 2004, revised manuscript received 5 April 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics