

基于 PEEC 方法的片内螺旋电感建模*

李富华^{1,2} 赵吉祥^{2,3} 李征帆²

(1 苏州大学电子信息学院, 苏州 215021)

(2 上海交通大学电子工程系, 上海 200030)

(3 中国计量学院信号与信息处理系, 杭州 310018)

摘要: 采用部分元等效电路方法, 结合近似的三维闭式格林函数, 在 10GHz 以下的频率范围提出了一种针对有耗硅衬底上螺旋电感的准静态建模新方法. 该方法充分考虑了有耗的硅衬底、趋肤效应、接近效应等因素对螺旋电感电特性的影响, 通过与全波分析方法对比, 证明在相当宽的频率范围该方法是有效、可行的, 可广泛应用于微波和射频硅集成电路的优化设计和仿真.

关键词: 片内螺旋电感; 部分元等效电路; 硅衬底集成电路; 微波无源电感

EEACC: 2140; 1350; 2560

中图分类号: TN454

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)04-0770-05

1 引言

随着硅集成电路工艺水平的不断提高, 晶体管的特征频率已近百吉赫兹, 特别是深亚微米 CMOS 集成电路, 由于其功耗小、成本低, 因此传统的由 GaAs 等高电子迁移率材料生产的微波、射频集成电路逐渐被 CMOS 工艺所替代^[1]. 在深亚微米 CMOS 射频集成电路中, 为了降低电源电压、功耗、噪声以及减小信号的畸变、提高工作频率, 采用射频电感是很好的解决方法. 因此自从 1990 年 Nguyen 和 Meyer^[2] 首次在硅集成电路中引入螺旋电感之后, 螺旋电感便在射频硅集成电路中得到了广泛应用. 由于硅衬底的电阻率较低 (约 10^{-2} $\Omega \cdot \text{cm}$), 有耗的硅衬底严重影响着螺旋电感的电特性, 因此硅衬底上的螺旋电感难以准确建模, 严重制约着射频集成电路的设计和仿真. 为此许多设计者利用实验测试的手段建立了螺旋电感的集总模型, 该方法对于特定的螺旋电感比较准确, 但其应用具有很大的局

限性, 不便于优化设计和仿真. 利用商用的全波电磁仿真工具虽然可以对任意结构的螺旋电感进行准确建模, 但效率太低, 不便于工程设计. 为了快速准确地建立满足工程设计的螺旋电感集总参数模型, 文献[3]采用了准静态的方法, 将螺旋电感看作许多导体线段的级联, 首先建立单一线段的集总参数模型, 再考虑线段之间的相互影响. 但该方法采用了二维格林函数近似计算电位系数, 而没有考虑导体的趋肤效应和导体之间的接近效应, 因此误差较大; 文献[4]采用准静态全电荷格林函数方法建模, 对于简单的多层结构效率较高, 但对于多层介质该方法有一定的局限性; 文献[5]采用准静态保角变化的方法建模, 该方法效率高, 在 1GHz 以下比较精确, 但在较高的工作频率下误差较大. 部分元等效电路方法 (partial element equivalent circuit, PEEC) 介于准静态和全波分析方法之间, 被广泛应用于微波和射频电路的建模中^[6,7], 为了克服上述文献中的局限性, 本文采用 PEEC 方法结合三维格林函数对片内螺旋电感进行建模.

*美国 Octillion 通信公司, 河南省教育厅资助项目

李富华 男, 1964 年出生, 博士, 主要从事深亚微米 CMOS 高速集成电路的研究.

赵吉祥 男, 1965 年出生, 博士, 主要从事高速集成电路中无源元件的电磁分析.

李征帆 男, 1936 年出生, 教授, 博士生导师, 从事高速集成电路的研究.

2004-04-29 收到, 2004-10-30 定稿

2 部分元等效电路理论

部分元等效电路法是由 Ruhli 于 1974 年首先提出的一种三维导体结构电磁场组合建模方法^[8]。PEEC 模型是由麦克斯韦方程组推导出的一种可适用于复杂形状导体结构的等效电路模型。在运用 PEEC 模型时,先将电路(导体,有时还包括介质)分割成为电容和电感单元,然后计算这些单元之间的自、互电容和电感,最后将这些部分元件构成的等效电路交给通用电路分析软件进行电路模拟。由于 PEEC 模型中等效电路的形式是由麦克斯韦方程导出的,因此在考虑了电磁作用传播中的时间延迟后,该模型可以完整描述电磁场的行为。

电荷密度为 ρ 、电流密度为 J 的源在空间任意一点产生的电场强度可表示为:

$$E_0(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \nabla \left(\frac{\rho(r, t)}{r} \right) + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \nabla \times \left(\frac{\nabla \times A(r, t)}{r} \right) \quad (1)$$

其中 ϵ_0 为导体的电导率; r 为场点的位置矢量; A 和 ϕ 分别为矢量磁位和标量电位。由 K 个导体构成的系统中的矢量磁位和标量电位分别为:

$$A(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{K} \frac{J(r', t')}{|r - r'|} dv' \quad (2)$$

$$\phi(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{K} \frac{q(r', t')}{|r - r'|} dv' \quad (3)$$

其中,积分核函数定义为 $K(r, r') = \frac{1}{|r - r'|}$ 。为了得到 PEEC 的表达式,需将导体的电流密度和导体的电荷密度离散化,通常选用矩形脉冲函数展开,即认为电流密度和电荷密度在很小的局部范围内是常数。将任意一个导体沿着 x, y, z 方向剖成 N_k 段,对于所考虑的电路问题,外加电场 $E_0 = 0$,将上式在每个体积电流单元上积分,就得到一组可视为支路伏安关系的方程,在第 l 个单元上的积分结果为:

$$\int_{v_l} J(r, t) dv_l + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \left[\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_l} \int_{v_n} \frac{J(r', t')}{|r - r'|} dv' dv_n \right] \frac{\partial J_{nk}(t)}{\partial t} + \sum_{k=1}^K \int_{v_l} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_k} K(r, r') q(r', t) ds \right] dv_l = 0 \quad (4)$$

上式两边同除以单元 l 的横截面积 a_l 后可简单表示为:

$$v_r + v_l + v_c = 0 \quad (5)$$

显然(5)式为等效电路的 Kirchoff 电压表达式,由此可得部分电阻 R 、部分电感 L 和电位系数 P 矩阵元素分别为:

$$R_{ii} = \frac{L_i}{a_i} \quad (6)$$

$$L_{pkl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{a_l}{a_i a_j} \int_{S_i} \int_{S_k} \frac{J_k J_l}{|r_k - r_l|} dv_k dv_l \quad (7)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_i} \int_{S_j} G(r_i, r) ds ds_i \quad (8)$$

其中 $G(r_i, r)$ 为标量位静电格林函数。

显然,采用 PEEC 方法可以将求解麦克斯韦问题转换成求解电路的支路电流和节点电位问题。对于特定的电磁问题,一旦上述矩阵参数被确定,便可求解等效的电流分布和电位分布。

3 螺旋电感的建模

硅集成电路中,螺旋电感有平面结构和侧向结构^[9],侧向结构难以获得足够的电感,因此芯片设计中通常采用矩形螺旋电感,如图 1 所示。为了减小有耗衬底对螺旋电感的影响,提高螺旋电感的品质因数,通常用集成电路的顶层布线层设计螺旋电感,通过层间过孔由相邻的下一个布线层引出。螺旋线圈的金属宽度 w 、线间距离 s 、最外圈边长 L_e 、圈数 n

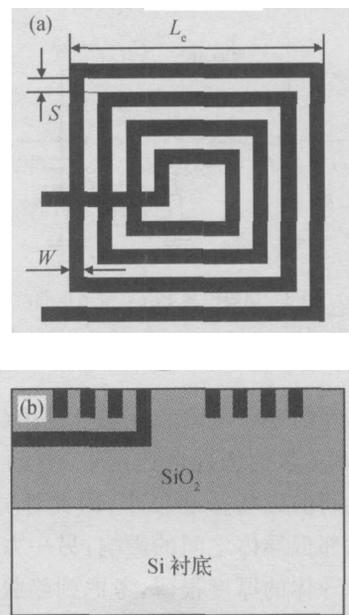


图 1 螺旋电感结构 (a) 顶视图;(b) 剖面图

Fig. 1 Structure of spiral inductor (a) Top view;(b) Cross section

圈端点接地,用本文的建模方法和三维仿真软件分别求得外圈端点在不同频率点的输入阻抗,其等效电阻和等效电感如图 3 所示.图中曲线为本文的仿真结果,点为全波三维电磁仿真结果.图 3 表明,本文的仿真结果在低频率与全波的仿真结果吻合得很好,在高频段受 PEEC 模型的局限性,两者有一定的误差,但该误差在工程设计的容许误差范围之内.由于 PEEC 建模的计算效率比全波仿真效率高得多,因此在螺旋电感的优化设计中本文的建模方法更有效.

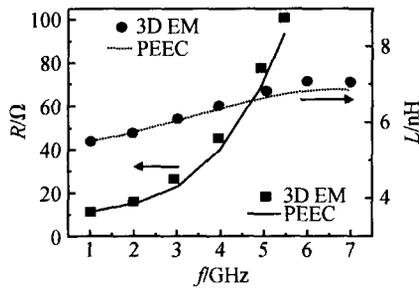


图 3 螺旋电感的一端口输入阻抗

Fig. 3 One-port impedances for spiral inductor

5 应用举例

根据上述建模理论和方法,通过编程,可以快速地建立螺旋电感的模型.例如:一个金属宽度 $9\mu\text{m}$ 、导体间距 $6\mu\text{m}$ 、圈数为 7.5 的矩形螺旋电感,其 y 参数随频率的变化曲线如图 4 所示.利用 Hspice 优化程序,便可以拟合出图 5 所示非频变模型的元件参数.即 $L_s = 7.66\text{nH}$, $R_s = 15.00$, $C_s = 11.53\text{fF}$, $C_{ox1} = 130.77\text{fF}$, $C_{sub1} = 45.19\text{fF}$, $R_{sub1} = 207.25$, $C_{ox2} = 145.96\text{fF}$, $C_{sub2} = 26.91\text{fF}$, $R_{sub2} = 364.94$, 其中 L_s 表示理想的电感, R_s 表示损耗(包括与频率有关的趋肤效应和高频效应), C_s 表示螺旋线和跳线之间的层叠电容, C_{ox} 表示二氧化硅层中位移电流的等效电容, C_{sub} 和 R_{sub} 分别表示硅衬底中位移电流的等效电容和传导电流的损耗.上述参数都是不随频率变化的,因此该模型方便地应用于射频电路的设计和优化中.

6 结语

本文运用部分元等效电路方法对有耗衬底上的螺旋电感进行了建模,并利用 Hspice 优化程序拟合

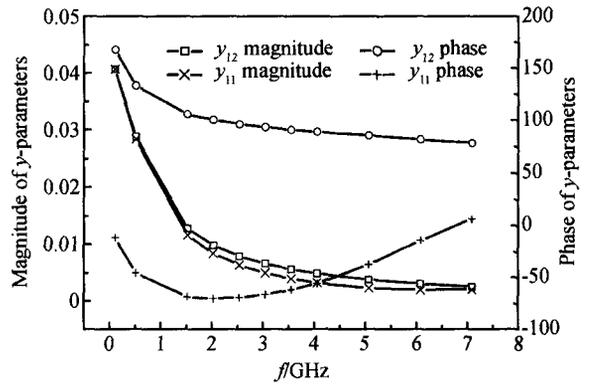


图 4 7.5 圈矩形螺旋电感的 y 参数

Fig. 4 y -parameters of the 7.5-turn square spiral inductor

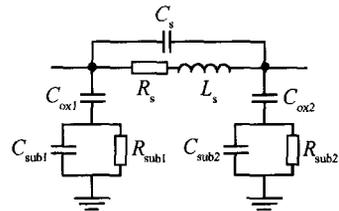


图 5 非频变螺旋电感模型

Fig. 5 Frequency-independent model of spiral inductor

出简化的电感模型参数.通过本模型的仿真结果与全波电磁仿真结果比较表明:用部分元等效电路对集成电路中的螺旋电感进行建模是准确有效的.为了解决 PEEC 建模中的大量数值计算问题,编程中采用多种计算方法和技巧,大大提高了计算效率.运用该建模方法可以方便地研究不同参数对螺旋电感 Q 值的影响,以及不同物理参数对螺旋电感特性的影响;在实际设计中,根据射频电路的具体电气参数,可以方便地对螺旋电感的结构尺寸进行全面的优化.

参考文献

[1] Li Fuhua, Dai Wenliang, Li Zhengfan, et al. Investigation and application of coplanar stripline on silicon substrate. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(9) :1181 (in Chinese) [李富华, 代文亮, 李征帆, 等. 硅衬底上共面线的特性研究及应用. 半导体学报, 2004, 25(9) :1181]

[2] Nguyen N M, Meyer R G. Si IC-compatible inductors and LC passive filters. IEEE J Solid-State Circuits, 1990, 25 :1028

[3] Long J R, Copeland M A. The modeling, characterization, and design of monolithic inductors for silicon RF IC 's. IEEE J Solid-State Circuits, 1997, 32 :357

- [4] Jiang Qifeng, Li Zhengfan. Modeling and analysis of spiral inductors for Si based RF IC 's. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(8) :1219 (in Chinese) [姜祁峰, 李征帆. 硅衬底 RF 集成电路中螺旋电感的建模和分析. *电子学报*, 2002, 30(8) :1219]
- [5] Zhao Jixiang, Mao Junfa. Parameters extraction and modeling for planar spiral inductor on Si-SiO₂ substrates by DDM for conformal modules. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2003, 51(6) :1763
- [6] Li Fuhua, Cao Yi, Li Zhengfan. Electromagnetic compatibility (EMC) analysis of planar structures with partial element equivalent circuit (PEEC) method. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2001, 35(11) :1607 (in Chinese) [李富华, 曹毅, 李征帆. 基于 PEEC 方法的平面电路 EMC 问题分析. *上海交通大学学报*, 2001, 35(11) :1607]
- [7] Cao Yi, Li Zhengfan, Mao Jifeng. A modified 3-D PEEC model in interconnect and packaging electric analysis. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(2) :65 (in Chinese) [曹毅, 李征帆, 毛吉峰. 互连封装结构电特性分析中的改进 PEEC 三维建模. *电子学报*, 2000, 28(2) :65]
- [8] Ruehli A E. Equivalent circuit models for three-dimensional multiconductor systems. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1974, 22:216
- [9] Liu Chang, Chen Xueliang, Yan Jinlong, et al. A novel lateral solenoidal on-chip integrated inductor implemented in conventional Si process. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23:353
- [10] Li Fuhua, Li Zhengfan. Three-dimensional closed-form Green 's function for multilayered lossy dielectric medium and its application. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(3) :345 (in Chinese) [李富华, 李征帆. 多层有耗介质中的三维闭式格林函数. *上海交通大学学报*, 2003, 37(3) :345]

Modeling for Spiral Inductors On-Chip with Partial Element Equivalent Circuit Method *

Li Fuhua^{1,2}, Zhao Jixiang^{2,3}, and Li Zhengfan²

(1 College of Electronics & Information, Suzhou University, Suzhou 215021, China)

(2 Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

(3 Department of Signal and Information Processing, Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A novel quasi-static method based on the partial element equivalent circuit method combined with an approximate three-dimensional closed-form Green 's function is proposed to model the spiral inductor on lossy silicon substrate below 10 GHz. Some important effects to electronic characteristic of spiral inductors such as lossy silicon substrate, nonuniform current distribution due to skin and proximity effects within each segment are considered in the method. The validity of the method is proved by comparing with the results of full-wave analysis method among a comparatively large frequency range, so it is both efficient and feasible. It can be extensively used in the optimization design and simulation of microwave and RF integrated circuits.

Key words: spiral inductor on-chip; partial element equivalent circuit; silicon substrate IC 's; microwave passive inductor
EEACC: 2140; 1350; 2560

Article ID: 0253-4177(2005)04-0770-05

* Project supported by Octillion Communications, Inc. USA and Office of Education of Henan Province

Li Fuhua male, was born in 1964, PhD. He is engaged in research on deep-submicron high-speed integrated circuits.

Zhao Jixiang male, was born in 1965, PhD. He is engaged in research on electromagnetic analysis of passive elements in high-speed integrated circuits.

Li Zhengfan male, was born in 1936, professor, adviser of PhD candidates. He is engaged in research on high-speed integrated circuits.

Received 29 April 2004, revised manuscript received 30 October 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics