

基于改进 $1-\pi$ 拓扑结构的螺旋电感可扩展模型

林泽^{1,2}, 陈静², 罗杰馨², 吕凯²

(1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要: 随着射频集成电路空前发展, 电感作为射频电路中重要无源器件应用越来越广. 目前其仿真模型应用频率范围较窄并且仿真结果与测试结果拟合较差. 本文提出了基于 $0.13\mu\text{m}$ SOI CMOS 工艺的片上螺旋电感修改模型. 模型采用了 $1-\pi$ 等效电路, 包含有表征衬底涡流的 RL 并联网络并且改进了由趋肤效应引起的金属线圈中涡流的表征. 利用数理统计中的回归分析方法, 得到扩展模型参数的表达式. 制备了 13 种不同尺寸的片上螺旋电感用于验证模型. 本文提出的方法, 对不同尺寸的电感在频率达到自谐振频率以上的行为提供了更好的电路解释.

关键词: 射频; 电感; 建模; 可扩展; 拓扑结构

中图分类号: TN454

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)09-2190-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.020

A Scalable Model of Spiral Inductor on Modified $1-\pi$ Topology

LIN Ze^{1,2}, CHEN Jing², LUO Jie-xin², LÜ Kai²

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: With the unprecedented development of radio frequency circuits, inductors as an important passive components in radio frequency circuit are applied more and more widely. Current inductor models have narrow application frequency range and simulation results are poor fit with measurement results. A modified scalable model for on-chip spiral inductors in $0.13\mu\text{m}$ silicon-on-insulator (SOI) CMOS process is developed. The model is a π -circuit with a parallel RL network connecting both vertical branches to account for substrate coupling. It includes improvements in the evaluation of eddy currents in metals caused by the proximity effect. The regression analysis method of mathematical statistics is used to obtain the expressions of scalable model parameters. 13 on-chip inductors with different geometries are fabricated for the verifications. The proposed approach can thus provide better circuit interpretations of the inductor behaviors for all considered geometries up to frequencies above self-resonance.

Key words: radio frequency (RF); inductor; modeling; scalable; topology

1 引言

物联网是信息化技术发展到现在一定阶段出现的新技术. 物联网将是下一个推动世界高速发展的重要生产力, 它通过射频识别 (RFID)、红外感应器、全球定位系统等信息传感设备, 按一定协议把物品通过互联网连接起来, 进行通讯以实现智能化. 物联网广泛应用于军事指挥与控制、旅游、生产、医疗、公共安全等多个领域.

射频 (RF) 表示可以辐射到空间的电磁频率, 频率范围从 300kHz 到 30GHz 之间. 射频技术常应用于无线射频识别 (RFID), 称为感应式电子晶片或感应卡、非接

触卡、电子标签等, 对物联网的实现起着决定性的作用. 从物联网体系来看, 可分为感知层、传输层和智能应用层三个层面, 感知层处于最前端起基础性作用, 其中最重要的技术就是 RFID 技术, 所以 RFID 在物联网发展中有着举足轻重的地位. 射频电路基本上由无源元件、有源元件和无源网络组成, 而其中有源元件要少于无源元件. 电感作为无源元件中占比较多的元件, 可实现阻抗匹配、可调谐负载、反馈、滤波等功能, 因而被广泛用于压控振荡器 (VCO)、低噪声放大器 (LNA)、功率放大器 (PA) 以及混频器 (Mixer) 等射频电路中, 其性能直接决定这些电路的性能.

1974 年 Greenhouse 在文献[1]中提出了电感算法理论为片上螺旋电感的研究奠定了理论基础,但受当时工艺的限制未能实现片上螺旋电感.随着工艺的发展,现已可以集成高品质的片上电感且有各种类型.片上螺旋电感有方形、六边形、八边形和圆形,其边数越多实现的性能越好,但圆形电感工艺实现比较复杂,一般采用多边形电感.同时,还有一些其他结构的电感可以提高性能,带静电屏蔽层的螺旋电感^[2]可以降低衬底的涡流,提高品质因子.多层结构的螺旋电感将金属层通过通孔并联起来,减小了电阻,增加了 Q 值.但金属和衬底的距离变近了,增加了寄生电容,降低了自谐振频率.然而当电感应用在放大器和混频器中时,需要较高的中频,这就需要电感的自谐振频率要足够高,改进的多层结构螺旋电感可以有效地提高电感的自谐振频率.

2 电感等效模型

从 1998 年斯坦福大学的 C. P. Yue 首次提出电感的两端口等效单 π 电路模型,其后,在对电感损耗机制和寄生参量的研究基础上人们又提出了各种集总模型,大致可以将它们分为三类:单 π 、双 π 和 T 模型.

2.1 1- π 模型

在考虑了金属间的涡流和寄生电容,金属圈和衬底之间的寄生电容以及衬底的欧姆损耗的基础上,C. P. Yue 提出了以下紧凑型的物理模型^[3].

物理模型的准确性主要看能否识别相关的寄生和它们的影响.图 1 所示的模型,线圈的感值和阻值由 L_s 和 R_s 分别表示.线圈和底层金属之间的重叠,使得两端口之间存在寄生电容 C_s ,金属层和衬底之间的氧化电容由 C_{ox} 表示.衬底的电阻 R_{si} 和电容 C_{si} 表征了它的欧姆损耗.

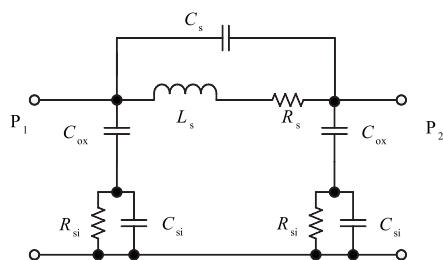


图1 1- π 模型等效电路

要达到快速且准确的电路仿真和优化,集总模型必须包含高频下的所有物理效应^[4].硅基片上螺旋电感模型中主要包括两大问题:(1)高频条件下金属线圈中的邻近和趋肤效应,随着频率的升高会越来越明显;(2)衬底的损耗,包含磁性损耗和电性损耗.这些现象都应该包含在模型之中,但在上述模型之中并没有考虑这些,使得模型只能用于特定的条件下.

在射频范围内得到一个准确的模型,必须要考虑电感的版图及工艺信息,比如,线宽、线距、外径、金属厚度、衬底导电率等等.文献[5]在文献[3]的基础上提出了一种改进的单 π 模型,充分考虑以上提到的电感模型中的两大问题.

2.2 2- π 模型

在自谐振频率以上,1- π 模型无法准确预测电感的特性,在综合考虑电感建模中要考虑的两大问题的基础上 Yu Cao 在文献[6]中提出了一种双 π 模型.在结构中,利用 RL 阶梯网络表示金属线圈的趋肤效应,阶梯层数越多对趋肤效应的表示也就越准确^[7].由于双 π 模型本身结构就较复杂,为使模型简单,使用了一层的 RL 结构.

由于双 π 模型的分布式特性,它在仿真电感时更加的准确.对于双 π 模型,参数提取是一个很重要的问题,利用传统的迭代优化选择算法,如遗传算法(GA)或指数梯度算法(EG)需要消耗很长的时间,并且得到的最优解不止一个.双 π 电路具有对称特性,可以看作 2 个 1- π 模型的级联.从而,我们可以先提取出 1- π 模型的参数,然后再扩展到 2- π 等效电路中.

3 1- π 拓扑结构

上述提到的模型都包含了衬底的电性损耗,但是,没有考虑到衬底的磁性损耗.在高频条件下,由于衬底的电阻率较低,容易产生涡旋电流.

3.1 衬底涡流

根据楞次定律,即感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化,衬底中有与线圈电流方向相反的感应电流.衬底涡流增加了衬底的损耗,同时增加了金属线圈阻抗,降低了电感的 Q 值.

根据图 2,可以将衬底涡流看作变压器模型, L_1 初级线圈在次级线圈 L_{sub} 中产生感应电流.

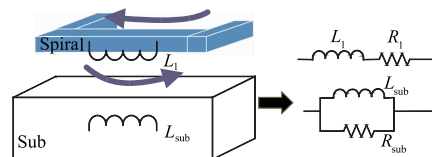
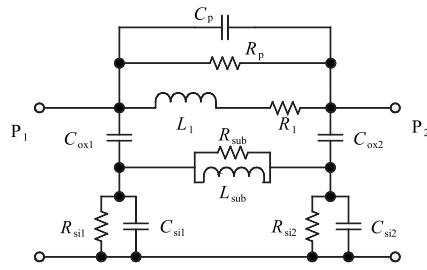


图2 衬底涡流模型

3.2 改进的 1- π 等效电路

如图 3 所示,改进后的 1- π 等效电路完善了衬底模型,增加了 R_p 表示两端口之间电阻,更有效表示金属线圈的损耗,提升 Q 值的拟合精度. R_{sub} , L_{sub} , R_{si} 和 C_{si} 表示衬底的横向及纵向损耗, C_{ox} 为氧化层电容, C_p 为端口之间的电容, L_1 , R_1 表示金属线圈的阻抗特性.

图3 改进的1- π 模型等效电路

4 模型扩展方法

这部分将要介绍如何从单点模型到可扩展模型的方法^[8],具体流程如图4所示^[9]。

现如今2- π 模型的应用比较广泛,尤其在高频衬底耦合和大尺寸电感的分布特性拟合上,但是由于模型中元件较多,提取困难,对模型进行扩展更是难上加难。为了可以扩展2- π 模型,可以将其参数提取过程简化,将2- π 模型看成两个1- π 模型。相比于2- π 模型,1- π 模型参数提取过程简单并且具有可靠的扩展特性。

本文提出了基于上述改进1- π 等效电路的可扩展电感模型。可扩展模型由圈数(n),线宽(w),间距(s)和内径(r)的不同变化组合而成,实验采用0.13 μm SOI CMOS工艺,选取了 n, w, s, r 大小不同的电感流片,具体版图参数如表1所示。

表1 电感版图结构参数

电感	n	w (μm)	s (μm)	r (μm)
I01_1	5.5	15	2	69
I01_2	5.5	15	2	86
I01_3	5.5	15	2	103
I02_1	5.5	15	2	120
I02_2	4.5	15	2	69
I02_3	3.5	15	2	69
I03_1	2.5	15	2	69
I03_2	5.5	12	2	69
I03_3	5.5	9	2	69
I04_1	5.5	18	2	69
I04_2	5.5	15	4	69
I04_3	5.5	15	6	69
I05_1	5.5	15	8	69

模型的扩展方法如图4所示,首先确定电感的尺寸和选用的等效电路。对每一个电感将等效电路中的元件参数值进行提取,查看随 n, w, s, r 中单参数的变化,电路中参数值的变化是否有趋势,如没有返回优化参数,否则逐一确定各参数值与 n, w, s, r 的关系形式。最终,通过回归分析的方法确定参数的表达式。

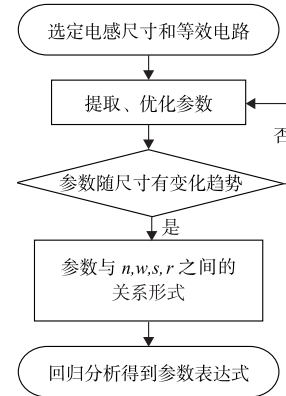


图4 模型扩展流程

表2 模型参数提取值

电感	C_p (fF)	R_p (k Ω)	R_1 (k Ω)	L_1 (nH)	C_{ox} (fF)	R_{sub} (k Ω)	L_{sub} (nH)	R_{si} (k Ω)	C_{si} (aF)
I01_1	40.7	4.057	4.659	8.361	10.82	5.8	33.0	1149	39.9
I01_2	40.1	5.065	6.489	10.34	20.8	2.3	6.03	1233	39.9
I01_3	38.0	11.08	10.9	12.38	39.6	0.3	4.29	1329	39.9
I02_1	38.0	55.4	12.12	14.36	61.15	0.18	3.78	1502	39.9
I02_2	35	4.166	3.637	5.06	6.897	3.2	21.4	1151	39.9
I02_3	30.6	3.999	4.164	3.34	12.02	0.9	3.03	1709	39.9
I03_1	24.1	4.012	3.096	2.292	43.2	0.04	0.322	757.2	39.9
I03_2	34.3	11.25	6.327	8.28	8.664	17.9	21.7	1105	39.9
I03_3	30.8	21.43	7.774	8.773	4.186	19.1	17.3	1233	39.9
I04_1	55.4	3.942	4.083	8.042	13.17	2.5	46.33	871.2	39.9
I04_2	40.1	4.07	5.249	8.497	12.27	4.3	12.58	871.2	39.9
I04_3	37.8	4.018	4.203	8.69	14.5	2.5	8.386	835.4	39.9
I05_1	34.2	4.018	3.942	8.888	16.02	2.5	8.386	746.4	39.9

利用数理统计的方法建立因变量与自变量之间的关系称之为回归分析,本实验利用版图参数及等效电路元件参数建立函数关系,属于多元非线性回归分析方法。通过绘制和观测散点图确定曲线的类型,如图5所示。通过数值分析测量的 S 参数,得到电感值 L ,品质因子 Q 和阻值 R ,其计算公式如下:

$$Q = \frac{\text{Im}(Y_{11}^{-1})}{\text{Re}(Y_{11}^{-1})} \quad (1)$$

$$R = \text{Re}(Y_{11}^{-1}) \quad (2)$$

$$L = \frac{\text{Im}(Y_{11}^{-1})}{2\pi f} \quad (3)$$

拟合得到的 Q, R, L 曲线,调整提取的参数值,从图5可以看到等效电路中 L_1 的值随 n 成二次函数变化,而随 w, s, r 都成线性变化关系,最终我们得到 L_1 的函数变化关系式为:

$$L_1 = a_1 \times n^2 + a_2 \times n + a_3 \times w + a_4 \times s + a_5 \times r + k \quad (4)$$

其中 (a_1, a_2, \dots, a_5) 为变量系数, k 为常数项。利用MATLAB中的非线性拟合函数nlinfit求出系数及常数项的值。同理,可以计算得到等效电路中其他元件参数值的公式。

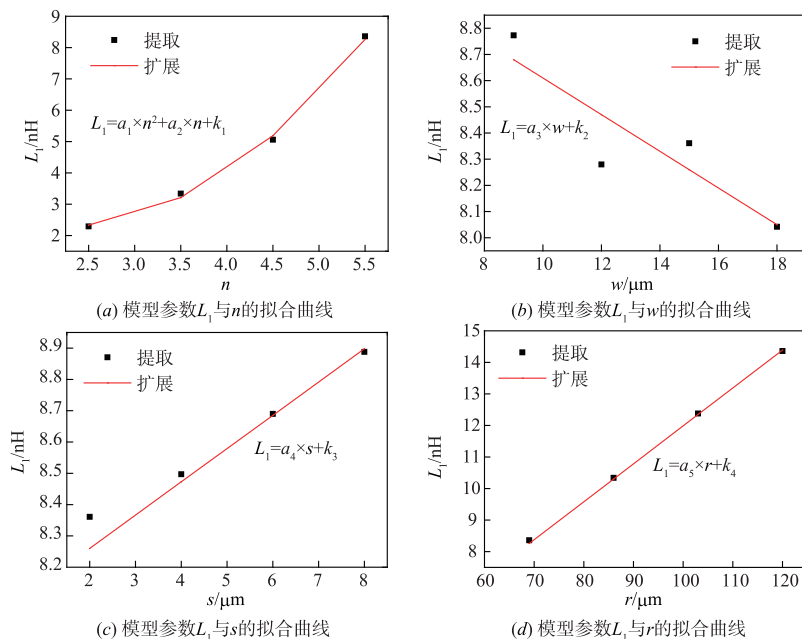


图5 模型参数拟合过程

5 模型验证

为验证新拓扑结构及其扩展模型,利用 $0.13\mu\text{m}$ 1P7M SOI CMOS 工艺流片 13 种不同结构的电感. 表 1 列出了不同结构的参数值,实验用 Agilent 的 N5244A 的网络分析仪及 CASCADE 的在片测试平台,测试范围从 100MHz 至 20.1GHz. 采用 open 和 short 去嵌结构,去除焊盘及馈线引起的寄生影响.

图 6 为原 $1-\pi$ 模型和改进后的模型 Q 值拟合结果的对比,其中虚线为原模型结果值,实线为改进后模型结果值,方块为测试结果值,从拟合结果可以看出,改进后的 $1-\pi$ 模型拟合效果要明显优于原模型. 图 7 列出了测试及扩展模型的 Q, R, L 值对比,测试结果与模型值吻合良好,从而说明模型的扩展方法是准确可靠的.

相比于文献[7],本文采用改进后 $1-\pi$ 模型,参数提取更容易且扩展方法更精简, Q 值在高频的拟合更加准确.

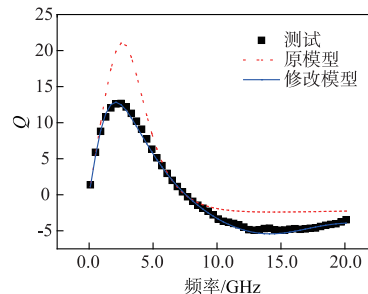


图6 $1-\pi$ 模型 Q 值拟合结果对比

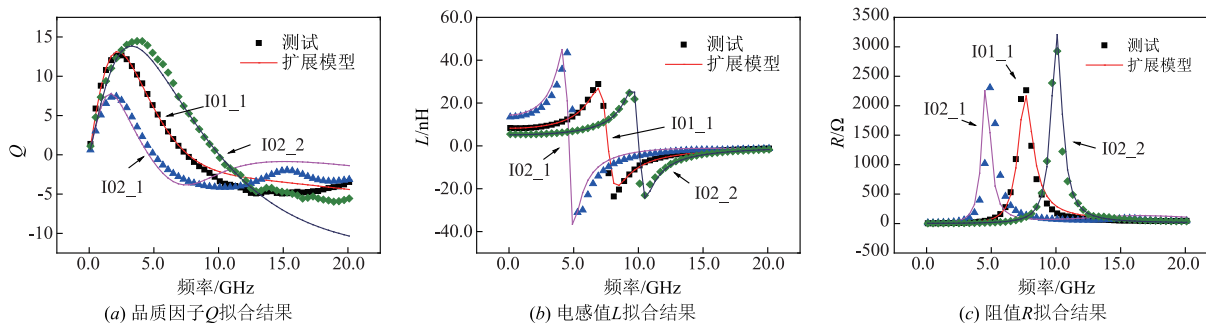


图7 扩展模型和测试结果拟合对比

6 总结

本文提出了改进后的 $1-\pi$ 模型,模型主要改进了衬底中横向涡流的表示方法并引入电阻 R_p 解决了 Q 值拟合不准的问题. 通过利用数理统计中的回归分析方法建立了扩展模型,扩展方法高效且简便. 在单点模型中,改进后模型在 Q 值拟合上要明显优于原模型. 利用 13 种不同尺寸的电感验证扩展模型,模型结果在 Q, R, L 值曲线上精确拟合.

参考文献

- [1] Greenhouse H M. Design of planar rectangular microelectronic inductors[J]. IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, 1974, 10(2): 101 - 109.
- [2] Yim S M, Chen T. The effects of a ground shield on the characteristics and performance of spiral inductors [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2002, 37(2): 237 - 244.
- [3] Yue C P, Wong S S. Physical modeling of spiral inductors on silicon [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2000, 47(3): 560 - 568.
- [4] Beryl R, Vaithianathan V, Kirubaveni S. Comparative analysis of various on-chip spiral inductors [A]. International Conference on Communications and Signal Processing [C]. Melmaruvathur, India: IEEE, 2013. 437 - 441.
- [5] Huo X, Chan P C H, Chen K J, et al. A physical model for on-chip spiral inductors with accurate substrate modeling [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2006, 53(12): 2942 - 2949.
- [6] Cao Y, Groves R A, Huang X, et al. Frequency-independent equivalent-circuit model for on-chip spiral inductors [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003, 38(3): 419 - 426.
- [7] Han B, Tian Z, Wang D. Analysis of scalable two- π equivalent-circuit model for on-chip spiral inductors [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2015, 25(2): 93 - 100.
- [8] Jun L, Lin Z, Huang W, et al. Double- π fully scalable model for on-chip spiral inductors [J]. Journal of Semiconductors, 2012, 33(8): 084007.
- [9] Huanhuan Z, Lingling S, Jincui W, et al. Scalable modeling and comparison for spiral inductors using enhanced $1-\pi$ and $2-\pi$ topologies [J]. Journal of Semiconductors, 2010, 31(5): 055011.

作者简介



林 泽 男, 1989 年生于安徽滁州, 现为上海大学通信与信息工程学院研究生. 主要研究方向为半导体器件建模及 RF 无源器件研究.

E-mail: linze@mail.sim.ac.cn