

The Design and Simulation of the RF Solenoid Microinductor

FANG Dong-ming*, ZHAO Xiao-lin, WANG Xi-ning, ZHOU Yong

(National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology Key Laboratory for Thin Film and Microfabrication of Ministry of Education Research Institute of Micro/Nano Science and Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to get high-performance MEMS solenoid microinductors, we considered the geometrical parameters' effects on the performance of the inductor, and simulated an inductor using High Frequency Structure Simulator (HFSS). The result of the simulation is similar to that of the fabricated inductor. The measurement result shows that the inductor have high Q -factor over wide range of operating frequency, which can be used in the field of wireless communication.

Key words: solenoid inductor; HFSS; quality factor; RF MEMS

EEACC: 2575; 2140

射频螺线管微电感的设计和仿真

方东明*, 赵小林, 王西宁, 周 勇

(上海交通大学微纳科学技术研究院, 微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 薄膜与微细技术教育部重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 为了获得高性能 MEMS 螺线管微电感, 考虑了几何结构参数对微电感性能的影响, 用 HFSS 软件对特定结构的微电感进行仿真, 仿真结果与实验研制的测量结果基本相符。测试结果表明微电感在较宽的工作频率范围内具有高 Q 值, 可以应用在无线通讯领域。

关键词: 螺线管电感; HFSS; 品质因素; 射频微机电系统

中图分类号: TM55

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2006)05-1878-03

现今 CMOS IC 技术还不能很好地提供高频电路所必需的高性能射频(RF)元件, 然而, 片上集成 RF MEMS 技术可以增强高速 IC 芯片的射频功能, 从而提高无线通信系统的性能。对无源和有源 RF MEMS 器件的研究和报道很多, 这些元器件有 MEMS 开关^[1-2]、谐振器/滤波器^[3-5]、可变电容^[6-10]和微电感^[11-14]等。根据电学和物理特性, 集成微电感可以分为三大类: 集成有源电感, 平面片上无源电感, 三维片上无源电感。用于表征微电感性能的主要参数有电感量 L 、品质因数 Q 和自谐振频率。对于微电感在射频电路上的应用, 要求微电感在某高频范围内具有大的电感量和品质因数, 并且自谐振频率不能太低。提高品质因数是集成微电感设计和优化的中心议题。同平面螺线结构的电感相比, 三维结构

的螺线管微电感由于采用了立体结构, 寄生电容和寄生电阻引起的寄生损耗降低, 提高了电感的 Q 值。

为了节约成本和估计螺线管微电感的高频性能, 本文先对特定几何结构的微电感进行优化设计, 然后进行仿真模拟, 再用 MEMS 技术制作高性能的微电感。

1 微电感的优化设计和仿真

提高微电感的 Q 值由多种方法: 采用高电导率的金属作为电感线圈材料以降低电感自身阻抗的影响; 高电阻率的衬底之上制作电感以减小衬底效应带来的性能衰减; 采用氧化层增厚或悬空电感的制作方式来增加电感的 Q 值; 用微机械的方法, 从硅片的顶部或底部选择性刻蚀去除部分硅材料, 形成

收稿日期: 2006-07-01

基金项目: 教育部科学技术研究重大项目资助(0307), 上海—应用材料研究与发展基金资助(0515)

作者简介: 方东明(1977-), 男, 安徽枞阳人, 博士研究生(通讯联系人), 目前从事射频微机电系统研究, fangdm@sjtu.edu.cn

悬浮式线圈^[15];在螺旋线圈的顶部或与衬底之间形成磁性材料层以增加电感量,从而增加 Q 值^[16]. 但对于既定的材料和实验工艺,在不增加工艺复杂性的前提下,可以通过版图上的设计和优化来提高微电感的 Q 值. 也就是说,对微电感的几何结构参数进行优化. 传统螺线管电感电感量计算公式:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A_c}{l_c} = \frac{\mu_0 \mu_r N l h}{w + s} \quad (1)$$

其中: A_c 是线圈横截面积, l_c 是电感线圈的轴向长度. 从公式(1)可以看出,增加柱子的高度或导线长度可以增加线圈的横截面积,减小导线的宽度可以有效减小电感线圈的轴向长度,从而都可以有效地提高微电感的电感量.

微电感品质因数 Q 的定义为^[17-18]:

$$Q = \frac{\omega L}{R_s} \cdot \text{衬底损耗因子} \cdot \text{自谐振因子} \quad (2)$$

其中: R_s 表示串联寄生电阻. 式(2)第一项表示串联寄生电阻的能量损耗因素,第二项表示衬底损耗因素,即能量在衬底中的损失部分,最后一项是微电感的自谐振因素. 从式(3)可以看出,采用绝缘衬底或高阻衬底,比如玻璃、陶瓷、高阻硅等可以增加 Q 值,本文所用的衬底为玻璃. 据文献^[19]报道,低电阻率金属线圈材料对微电感在很高频率下获得大的 Q 值很重要,本文采用低电阻率金属材料铜作为线圈,因此串联寄生电阻大大减小,从而改善微电感的性能.

在微电感的几何结构参数中,增加柱子高度可以提高电感量和 Q 值外,其它几何结构参数对电感高频性能的影响有:① 增加线圈匝数虽然可以提高电感量,但是在射频下寄生效应引起的损耗会增大, Q 值反而会下降;② 线圈导线长度增加,使得线圈导线的自感和互感增大,从而使总电感量增大,并使 Q 值上升;③ 线圈导线宽度增加,使得线圈导线的自感减小,从而使总电感量下降,同时增大线圈寄生电容和涡流损耗,从而使 Q 值降低. ④ 线圈导线间距离增加,使得线圈之间的耦合电感即互感减小,从而使总电感量稍微下降,但导线间距离增大可以减小线圈寄生电容和涡流损耗,从而使 Q 值上升. 虽然增加导线长度和导线间距有利于提高 Q 值,但是会使得电感所占芯片面积增大,不利于元器件的小型化. 根据以上微电感优化设计分析,决定采用电感的几何结构参数为:线圈匝数 $N=7$,导线长度、宽度、厚度分别为 $l=350 \mu\text{m}$, $w=50 \mu\text{m}$, $t=5 \mu\text{m}$,相邻导线间距 $s=40 \mu\text{m}$,柱子高度 $h=40 \mu\text{m}$.

HFSS(High Frequency Structure Simulator)是 Ansoft 公司开发的高频器件仿真分析软件,它可以对射频领域的天线、滤波器、谐振器、微电感等器件进行高频仿真. 图 1 是 HFSS V9.2 建立的螺线

管微电感的物理模型,其结构采用优化的几何结构. 衬底为玻璃衬底,电感线圈、共面波导线和衬垫采用金属铜,在设置材料属性后,再在共面波导线两侧加设两端口,然后设置边界条件、仿真频率范围和网格划分条件,最后进行仿真.

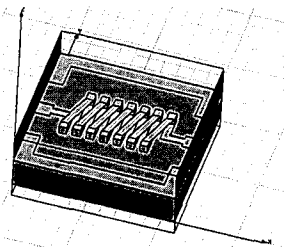


图1 螺线管微电感的仿真模型

2 器件制作和测量

采用 MEMS 表面微机械加工技术制作三维螺线管微电感,具体制作过程可参考文献^[13]. 大致工艺流程如下:① 在衬底上溅射种子层,甩胶、光刻,电镀铜材料,形成共面波导线、衬垫和下层线圈;② 丙酮去胶,甩厚胶,光刻,电镀铜形成线圈的柱子;③ 丙酮去胶,干法刻蚀种子层,甩厚胶(抛光保护层),抛光抛出柱子;④ 溅射顶层种子层,甩胶,光刻,电镀铜形成顶层线圈;⑤ 无掩模曝光去胶,干法刻蚀掉顶层种子层,再用丙酮去除所有光刻胶,整个电感制作完成. 该工艺与传统 IC 工艺相兼容.

采用两端口网络模型来处理所测量的数据. 微电感的散射 S 参数用 HP8722D 矢量网络分析仪来测量,测量频率从 50 MHz 到 10 GHz. 在测量 S 参数之前需校准网络分析仪. 在测得 S 参数之后,将 S 参数转化成导纳 Y 参数^[20],再计算所测螺线管微电感的电感量 L 和品质因数 Q ^[21-22].

3 结 果

图 2 是 MEMS 技术制作的微电感 SEM 照片. 图 3 是 HFSS9.2 仿真后的电感量和 Q 值结果,图 4 是数值测量结果. 仿真结果显示电感量在 0.5~10 GHz 之间大小为 1.75~3 nH, Q 值在 15~30 之间,最大 Q 值在 3.5 GHz 处,约为 28,对应电感量为 1.78 nH;实验结果显示电感量在 0.5~10 GHz



图2 实验制作的 MEMS 微电感

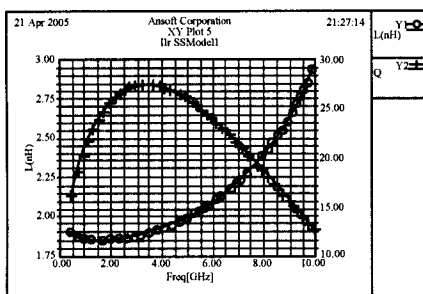


图3 HFSS微电感仿真结果

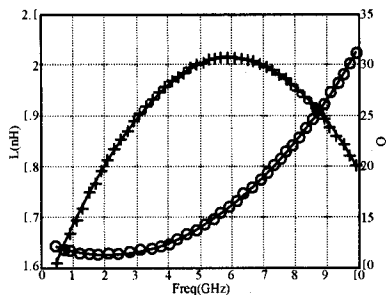


图4 实验制作的微电感测试结果

之间大小为 $1.6 \sim 2.1$ nH, Q 值在 $10 \sim 32$ 之间, 最大 Q 值在 6 GHz 处, 约为 31 , 对应电感量为 1.72 nH. 仿真结果能较好地反映实验结果. 实验制作的微电感在高频范围内有较好的性能, 在较宽的工作频率范围内具有高 Q 值.

4 结论

分析了微电感的几何结构参数对电感性能的影响, HFSS 仿真结果与实验结果大致符合, 应用 HFSS 可以节约成本, 大大提高工作效率. 实验制作的螺旋管微电感性能较好, 可以应用在微波/射频领域.

参考文献:

- [1] Huang J M, Liew K M, Wong C H, et al. Mechanical Design and Optimization of Capacitive Micromachined Switch[J]. Sensors and Actuators, 2001, 93(3): 276-285.
- [2] Rebeiz G M, Muldavin J B. RF MEMS Switches and Switch Circuits[J]. IEEE Microwave Magazine, 2001, 2(4): 59-71.
- [3] Nguyen C T C. Micromechanical Resonators for Oscillators and Filters[C]//Proceedings of 1995 IEEE International Ultrasonics Symposium, Seattle, 1995, 7-10: 489-496.
- [4] Tsu W T, Clark J R, Nguyen C T C. Q-Optimized Lateral Free-free Beam Micromechanical Resonators[C]//Digest of Technical Papers, the 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors & Actuators (Transducers 01), Munich, Germany, 2001, (6): 1110-1113.
- [5] Stickh M, Eleftheriades G V, Kremer P. A high Q Bulk Micromachined Silicon Cavity Resonator at Ka-Band[C]//Electronics Letters 29th, 2001, (3): 433-435.
- [6] Liu Qing-Quan, Huang Qing-An. Laterally Driven Variable Capacitor for Displacement Measurement of Microactuators. [J]. Pro. SPIE, 2002, 4928: 108-112.
- [7] Darin J Young, Bernhard E Boser. A Micromachine-Based RF Low-Noise Voltage-Controlled Oscillator[C]//IEEE 1997 Acoustom Integrated Circuits Conference, 1997: 431-434.
- [8] J B Yoon, C T C Nguyen. A High-Q Tunable Micromechanical Capacitor With Movable Dielectric for RF Applications[C]//Technical Digest IEEE Int Electron Devices Meeting, 2000, 12: 489-492.
- [9] Borwick R L III, Stupar P A, DeNatale J, Anderson R, et al. A High Q, Large Tuning Range, Tunable Capacitor for RF Applications[C]//The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002, 1: 669-672.
- [10] Seonho Seok, Chul Nam, Wonseo Choi, Soon Don Choi and Kukjin Chun. A Novel MEMS LC Tank for RF Voltage Controlled Oscillator (VCO) [C]//The Transducers'01 Munich Germany Eurosensors XV, 2001, 6: 1544-1547.
- [11] Pisani M B, Hibert C, Bouvet D, Beaud P, Ionescu A M. Copper/Polyimide Fabrication Process for Above-IC Integration of High Quality Factor Inductors[J]. Microelectronic Engineering, 2004, 73-74: 474-479.
- [12] Zou J, Liu C, Trainor D R, S-Aine J E, et al. Development of Three-Dimensional Inductors Using Plastic Deformation Magnetic Assembly (PDMA) [J]. IEEE Trans. On Microwave Theory and Tech., 2003, 51(4): 1067-1075.
- [13] Xi-Ning Wang, Xiao-Lin Zhao, Yong Zhou, et al. Fabrication and Performance of a Novel Suspended RF Spiral Inductor[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2004, 51(5): 814-816.
- [14] Vladimir Ermolov, Tomas Lindstrom, Heikki Nieminen, Michael Read, et al. Microreplicated RF Toroidal Inductor[J]. IEEE Trans. On Microwave Theory and Technology, 2004, 52(1): 29-37.
- [15] Ribas R P, Lescot J, Leclercq J L, Karam J M. Micromachined Microwave Planar Spiral Inductors and Transformers [J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(8): 1326-1334.
- [16] Yan Zhuang, B. Rejaei, E. Boellaard, M. Vroubel, and Burghartz, Integrated Solenoid Inductors with Patterned, Sputter-Deposited Cr/Fe₁₀Co₉₀/Cr Ferromagnetic Cores [J]. IEEE Electron Device Letters, 2003, 24(4): 224-226.
- [17] C. Patrick Yue and S. Simon Wong. On-Chip Spiral Inductors with Patterned Ground Shields for Si-Based RF IC's [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1998, 33(5): 743-752.
- [18] Booker H G. Energy in Electromagnetism[M]. London/New York: Peter Peregrinus (on behalf of the IEE), 1982.
- [19] Yoon-Jun Kim and Mark G. Allen. Surface Micromachined Solenoid Inductors for High Frequency Applications [J]. IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol., Jan. 1998, 21: 26.
- [20] Linder S. S-Parameter Techniques for Faster, More Accurate Network Design[R]. HP Application Note 95-1, Hewlett Packard, 1996.
- [21] Arcioni P, Castello R, Astis G D, et al. Measurement and Modeling of Si Integrated Inductors[J]. IEEE Instrumentation and Measurement, 1998, 47(5): 1372-1378.
- [22] I. J. Bahl. High-performance Inductors[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Apr. 2001, 49(4): 654-664.