

# 高性能螺线管微电感的制作<sup>\*</sup>

方东明<sup>†</sup> 周 勇 赵小林

(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:** 利用 MEMS 技术制作了高性能的空芯螺线管型射频微机械电感. 这种微电感采用铜线圈以减小线圈寄生电阻, 整个微电感的面积是  $880\mu\text{m} \times 350\mu\text{m}$ , 与平面螺旋型微电感相比, 有效地节省了芯片面积. 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, 微电感最大  $Q$  值为 38 (@6GHz), 对应的电感量为 1.82nH.

**关键词:** 螺线管电感; 射频微机电系统; 品质因素; 三维

**PACC:** 0710C; 7230

**中图分类号:** TM55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)08-1422-04

## 1 引言

在射频微机电系统(RF MEMS)元器件中, 电感是重要的元件. 它是滤波器、谐振器的重要组成部分, 影响着谐振电路、阻抗匹配网络、低噪声放大器、压控振荡器的性能. 随着对高频电子器件的需求量越来越大, 提高和改善 MEMS 微电感的高频性能已成为国内外学者的研究重点. 同时, 由于要符合大规模集成电路的高集成度、低成本的发展要求, 片上无源微电感不仅可与片上电路相集成, 而且要能显著减少其在芯片上的所占面积, 从而达到电路高度集成的目的. 传统的微机械电感多采用平面螺旋结构, 存在着电感值低、寄生损耗大、占用硅片面积大等缺点. 与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, 螺线管型微电感器所产生的磁通是平行于基片平面的, 所以高频磁通在基片上产生的涡流损失比磁通垂直于基片的平面线圈结构微电感的要小, 底导线与衬底的接触面积较小, 衬底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.

Kim 和 Allen 利用表面加工工艺, 制作了具有空气隙的悬浮螺线管电感<sup>[1]</sup>. 他们用蓝宝石作衬底, 用 DuPont PI-2611 聚酰亚胺作为牺牲层, 用电镀铜作为线圈, 空气隙的高度分别为 20 和 50 $\mu\text{m}$ , 最大高深宽比为 1 : 1.5. 对于 6 匝线圈, 电感量可达 2nH,  $Q$  值高达 58, 但是整个工艺比较复杂, 付出成本较高. Yoon 等人<sup>[2]</sup>也利用了表面微加工技术, 采用传统光刻和铜的电镀, 分别在低阻硅 ( $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$ ) 和玻璃衬底上制作了几何结构参数相同的螺线管电

感. 硅衬底上  $Q$  峰值 (@6GHz) 为 16.7, 对应电感量为 2.67nH, 而玻璃衬底上  $Q$  峰值 (@8.4GHz) 为 25.1, 对应电感量为 2.3nH. 当然, 除了表面加工工艺, 还可以利用体加工工艺的方法制作螺线管电感. Liang 等人<sup>[3]</sup>用一种新颖的体加工工艺制作了性能良好的螺线管电感, 用此工艺制作的电感, 具有大的横截面积, 线圈、侧壁和底槽没有接触, 从而减小了寄生效应.  $Q$  峰值 (@8.4GHz) 为 23.7, 对应电感量为 2.2nH. 本文利用 MEMS 工艺制作了三维螺线管微电感, 该电感所占芯片面积小, 在高频时不仅具有高的  $Q$  值, 而且电感量也比较大, 同时, 整个电感制作工艺简单, 制作成本低. 该工艺除了可用于螺线管微电感的加工, 还可以用来加工其他三维结构的 MEMS 器件.

## 2 微电感的设计和制作工艺

微电感在高频下的性能不仅与衬底、线圈材料等有关, 还与电感的几何结构参数有关. 根据 Greenhouse 在 1974 年给出的微电感的电感值理论计算公式<sup>[4]</sup>, 以及微电感的  $Q$  值理论表达式<sup>[5]</sup>, 对各种不同几何结构参数的螺线管微电感进行了数值模拟, 发现电感线圈的匝数 ( $N$ )、导线的长度 ( $l$ )、导线的宽度 ( $w$ )、柱子的高度 ( $h$ ) 以及相邻导线间的距离 ( $s$ ) 对微电感的高频性能有很大影响. 图 1 所示的是导线的长度和宽度变化时, 在高频下微电感  $Q$  值的模拟数值 (玻璃衬底, 铜线圈), 其一般规律是导线越长或导线越窄, 微电感的  $Q$  值就越大. 其他参数为:  $N = 7$ ,  $h = 45\mu\text{m}$ ,  $s = 40\mu\text{m}$ . 本文的微电感是经过参数优化而设计制作的.

<sup>\*</sup> 教育部科学技术研究计划 (批准号: 0307) 和上海应用材料研究发展基金 (批准号: 0515) 资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: fangdm @sjtu.edu.cn

2006-01-06 收到, 2006-02-12 定稿

©2006 中国电子学会

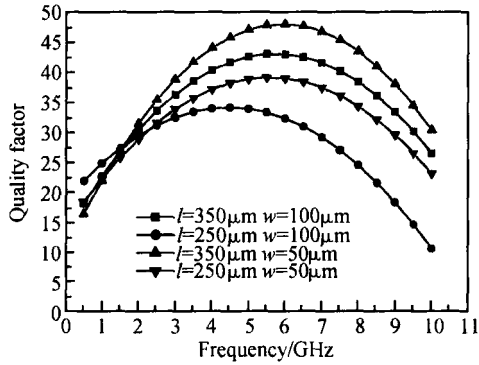


图 1 不同频率下导线长度(宽度)变化时微电感的  $Q$  值模拟  
Fig. 1 Simulated  $Q$ -factor values of microinductor with different conductor length/ width as a function of frequency

螺线管射频微电感的制作工艺如图 2 所示. 具体流程为: (a) 清洗玻璃衬底; (b) 在玻璃衬底上淀积一层 Cr/ Cu (10nm/ 90nm) 种子层; (c) 在种子层上方甩一层正性光刻胶, 经过烘胶、曝光和显影, 形成底层导线和共面波导线的模子, 再用电镀工艺电镀铜, 形成微电感的底层导线和共面波导线的图形; (d) 用丙酮去掉光刻胶, 再甩一层较厚的光刻胶, 经过烘胶、曝光和显影, 再电镀铜形成微电感的柱子. (e) 用丙酮去掉光刻胶, 用干法刻蚀掉种子层, 第三次甩胶, 这次甩的胶高出柱子少许. (f) 对光刻胶进行抛光, 抛出柱子; (g) 在光刻胶上淀积一层 Cr/ Cu (10nm/ 90nm) 种子层, 第四次甩胶, 经过烘胶、曝光和显影, 再电镀铜形成微电感的顶层导线; (h) 曝光去胶, 干法刻蚀种子层, 最后用丙酮去除所有光刻胶.

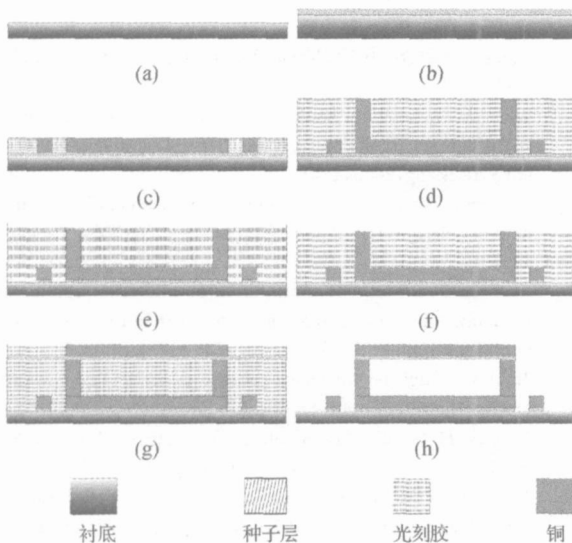


图 2 制作工艺流程图

Fig. 2 Schematic of the fabrication process flow

### 3 结果与分析

图 3 所示的是螺线管微电感的 SEM 照片, 微电感的面积是  $880\mu\text{m} \times 350\mu\text{m}$ , 其几何结构参数为:  $N = 7, l = 350\mu\text{m}, w = 50\mu\text{m}, h = 45\mu\text{m}, s = 40\mu\text{m}$ .

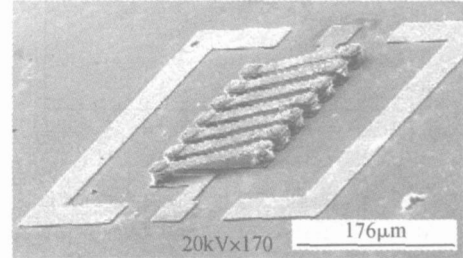


图 3 螺线管微电感 SEM 图

Fig. 3 SEM photograph of a fabricated solenoid micro-inductor

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, 探针间距为  $250\mu\text{m}$ , 测量频率从 50MHz 到 10GHz. 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<sup>[6]</sup>, 再由 (1) 式和 (2) 式分别计算所测螺线管微电感的电感量  $L$  和品质因数  $Q$ <sup>[7,8]</sup>, 系统特征阻抗  $Z_0 = 50 \Omega$ . 图 4 所示的是螺线管微电感的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  参数, 图 5 所示的是微电感的  $L$  和  $Q$  值随频率变化的曲线.

$$L = \frac{\text{Im} \left( \frac{1}{Y_{11}} \right)}{2 f} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\text{Im} \left( \frac{1}{Y_{11}} \right)}{\text{Re} \left( \frac{1}{Y_{11}} \right)} \quad (2)$$

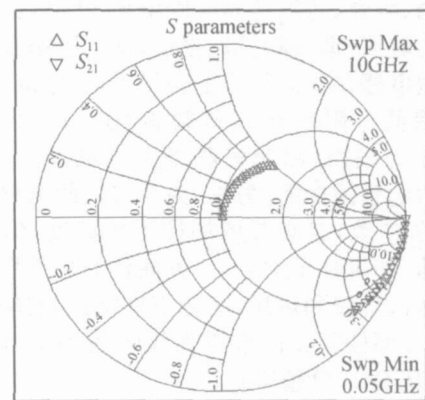


图 4  $S_{11}$  和  $S_{21}$  参数 Smith 圆图

Fig. 4 Measured values of  $S_{11}$  and  $S_{21}$  parameters plotted on a Smith chart

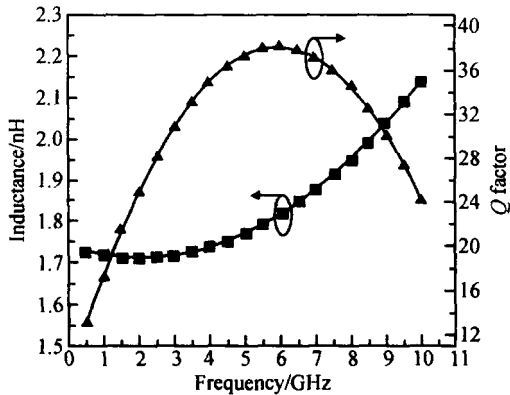


图 5 微电感的电感量和  $Q$  值随频率的变化

Fig. 5 Measured results of  $L$  and  $Q$  as a function of frequency

从图 5 可以看出,随着频率的升高,电感量上升, $Q$  值先上升后下降,在 6GHz 达到最大值,为 38,对应电感量  $L$  为 1.82nH,自谐振频率也较高,约为 13GHz. 整个微电感在较宽频率范围内具有较高的  $Q$  值.

微电感品质因数  $Q$  的定义为<sup>[9,10]</sup>:

$$\begin{aligned}
 Q &= 2 \times \frac{\text{储存的能量}}{\text{一个振荡周期中损耗的能量}} \\
 &= 2 \times \frac{\text{最大磁场能量} - \text{最大电场能量}}{\text{一个振荡周期中损耗的能量}} \\
 &= \frac{L}{R_s} \times \text{衬底损耗因子} \times \text{自谐振因子} \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中  $R_s$  表示串联寄生电阻.(3) 式中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,用来表征由于频率增大致使电场能最大值增加而使  $Q$  值减小以及超过谐振频率后  $Q$  值等于零的两种因素.

从(3)式可以看出,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[11]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 ( $\rho = 1.724 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ) 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. 另外,为获得高的电感量从而获得高的  $Q$  值,有必要增加柱子的高度,但柱子高度要合适,如果柱子太高,一方面作为牺牲层的正胶要进行多次甩胶和烘烤,工艺不好掌握,实验容易失败;另一方面柱子太高会增加线圈的寄生电阻和寄生电容,从而使  $Q$  值降低.

在微电感的几何结构参数中,除了考虑柱子高度外,还要考虑其他几何结构参数对电感高频性能的影响:(1)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;(2)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.(3)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,但会使电感所占芯片面积增大,不利于元器件的小型化.

## 4 结论

在玻璃衬底上用 MEMS 工艺制作了高性能的射频螺旋管微电感,微电感线圈采用电镀铜材料,整个制作工艺简单,成本低,与集成电路工艺相兼容. 测量结果表明,微电感在高频较宽范围内具有较高的  $Q$  值,在 6GHz 时  $Q$  值最大,为 38,对应电感量为 1.82nH,自谐振频率约为 13GHz. 另外与平面螺旋微电感相比,螺旋管微电感有效减少了所占芯片的面积. 因此螺旋管微电感在射频集成电路领域具有广泛的应用前景.

## 参考文献

- [1] Kim Y J, Allen M G. Surface micromachined solenoid inductors for high frequency applications. IEEE Trans Comp, Pack, Manuf Technol, 1998, 21(1): 26
- [2] Yoon J B, Kim B K, Han C H, et al. Surface micromachined solenoid on-Si and on-glass inductors for RF applications. IEEE Electron Device Lett, 1999, 20(9): 487
- [3] Liang Y C, Zeng Wengjiang, Ong Pick Hong, et al. A concise process technology for 3-D suspended radio frequency micro-inductors on silicon substrate. IEEE Electron Device Lett, 2002, 23(12): 700
- [4] Greenhouse H M. Design of planar rectangular microelectronic inductors. IEEE Trans Parts, Hybrids, Packag, 1974, 10(2): 101
- [5] Post J E. Optimizing the design of spiral inductors on silicon. IEEE Trans Circuits and System: Analog and Digital Signal Processing, 2000, 47(1): 15
- [6] Linder S. S-parameter techniques for faster, more accurate network design, HP application note 95-1, Hewlett Packard, 1996
- [7] Arcioni P, Castello R, Astis G D, et al. Measurement and modeling of Si integrated inductors. IEEE Instrumentation and Measurement, 1998, 47(5): 1372
- [8] Bahl I J. High-performance inductors. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2001, 49(4): 654
- [9] Booker H G. Energy in electromagnetism. London/New York: Peter Peregrinus (on behalf of the IEEE), 1982
- [10] Yue C P, Wong S S. On-chip spiral inductors with patterned ground shields for Si-based RF IC's. IEEE J Solid-State Circuits, 1998, 33(5): 743
- [11] Kim Y J, Allen M G. Surface micromachined solenoid inductors for high frequency applications. IEEE Trans Comp, Packag, Manuf Technol, 1998, 21: 26

## Fabrication of a High-Performance Solenoid Microinductor<sup>\*</sup>

Fang Dongming<sup>†</sup>, Zhou Yong, and Zhao Xiaolin

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

**Abstract:** A high-performance RF solenoid microinductor is fabricated using microelectromechanical systems technology. This inductor employs an electroplated copper coil to reduce the series resistance, and its total area is  $880\mu\text{m} \times 350\mu\text{m}$ , which saves chip area significantly compared with planar microinductors. The measurement results show that this inductor has a high Q-factor over a wide range of operating frequencies. The maximum Q-factor of this inductor is 38 and the inductance is 1.82nH at 6GHz.

**Key words:** solenoid inductor; RF MEMS; quality factor; three-dimension

**PACC:** 0710C; 7230

**Article ID:** 0253-4177(2006)08-1422-04

---

<sup>\*</sup>Project supported by the Key Project of the Chinese Ministry of Education (No. 0307) and the Found of Shanghai Applied Material Research and Development (No. 0515)

<sup>†</sup>Corresponding author. Email: fangdm@sjtu.edu.cn

Received 6 January 2006, revised manuscript received 12 February 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics