

硅微机械悬浮结构电感的设计与制作工艺研究

丁 勇, 刘泽文, 刘理天, 李志坚

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘 要: 本文系统分析了影响平面螺旋电感 Q 值的主要因素, 并制作出一种应用于射频通信的硅微机械悬浮结构电感. 在考虑趋肤效应、涡流损耗等高频电磁场效应对电感 Q 值的影响后, 获得了微机械电感的简化电学模型, 得到了具有较高 Q 值电感的优化结构. 在制作硅微机械电感的工艺过程中, 采用多孔硅作为牺牲层材料, 将螺旋结构铝线圈制作在二氧化硅薄膜上, 在使用添加了硅粉和过硫酸铵的 TMAH 溶液释放牺牲层之后, 得到设计值为 4nH 的悬浮结构微机械平面螺旋电感. 实验结果证明, 整个工艺流程可靠, 并与 CMOS 工艺兼容.

关键词: 微机械; 电感; Q 值; 多孔硅; 牺牲层

中图分类号: TM 55; TN 305 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 11-1597-04

Design and Fabrication of Silicon Micromachining Suspended Inductor

DING Yong, LIU Ze-wen, LIU Li-tian, LI Zhi-jian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The factors which determine the quality (Q) factor of planar spiral inductor are presented in this paper, and a technology to fabricate suspended MEMS devices for RF circuits is presented. A simplified electrical model is used to study the influence of high frequency magnetic fields on the parasitical resistance, including the eddy effect and skin effect. To get high Q suspended inductor, porous silicon (PS) is used as sacrificial layer, and SiO_2 film is used as a support membrane. During the process, TMAH solution with Si powder and $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ is used to remove the PS layer through small etching holes with no influence on the uncovered Al in the devices. A suspended inductor structure is realized using this technology. The fabrication is proved to be reliable.

Key words: MEMS; inductor; quality (Q) factor; porous silicon; sacrificial layer

1 引言

近来, 利用硅工艺制作单片微波集成电路 (MMIC), 已成为目前 IC 的研究热点. 作为无线通信系统中的重要元件, 电感的品质直接决定了整个电路的性能. 若采用 CMOS 标准工艺将电感集成到硅集成电路中, 电路中的各种寄生效应 (特别是衬底损耗) 将严重影响电感的品质因数 (Q 值). 因此, 人们致力于寻找提高电感 Q 值的方法.

微机械 (MEMS) 技术的发展为硅 MMIC 提供了新的解决方案. 通过采用牺牲层、深刻蚀等工艺, 可以有效控制集成电路中的衬底寄生效应, 明显提高电感的性能. 人们已经研制出不同结构、不同制作方法的微机械平面螺旋电感^[1]. 但这些方案面临的一个重要问题是工艺复杂、重复性差, 而且难于

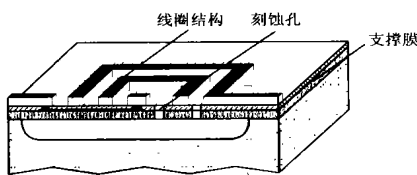


图 1 MEMS 悬浮结构螺旋电感示意图

实现与 CMOS 电路的兼容, 限制了自身的应用. 我们使用多孔硅材料作为牺牲层, 并采用与 CMOS 兼容的牺牲层释放工艺将电感制作在悬浮薄膜上, 得到的平面螺旋结构悬浮 MEMS 电感的结构示意图如图 1 所示.

2 寄生效应分析

影响平面螺旋结构电感 Q 值的主要因素是器件的各种寄生效应引起的大量损耗, 这些寄生效应可以通过一定的等效元件表示, 如图 2 (a) 所示.

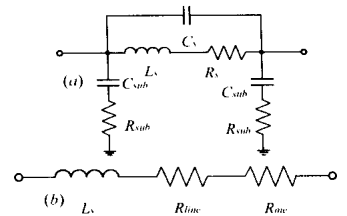


图 2 平面螺旋电感的等效电路

(a) 完整等效电路;

(b) 简化等效电路

图中, C_{sub} 为衬底寄生电容, R_{sub} 为衬底漏电电阻, C_s 为线圈之间的寄生电容 (一般情况下可忽略^[2]), R_s 为总寄生电阻, 它由电阻 R_{line} 、 R_{me} 、 R_{se} 串联而成. 其中, R_{line} 为导线电阻, R_{me} 为金属涡流损耗等效电阻, R_{se} 为衬底涡流损耗等效电阻. 在这些寄生元件中, 衬底寄生元件 C_{sub} 、 R_{sub} 和 R_{se} 是

影响电感 Q 值的主要因素, 当采用微机械方法去除电感结构下的衬底, 形成悬浮结构时, 这些元件寄生元件均可忽略. 因此图 2(a) 所示等效电路可简化为图 2(b) 所示电路. 在此基础上对高频 ($> 1\text{GHz}$) 下金属导体的寄生电阻进行进一步电磁学分析, 可获得对电感 Q 值进行定量计算的方法. 将这一结果用于电感设计, 可获得优化的器件.

3 Q 值计算与结构优化

Q 值的基本意义是一个工作周期中元件的总储能与其能耗之比, 对于等效阻抗为 Z 的元件, 有

$$Q = \text{Im}(Z) / \text{Re}(Z) \quad (1)$$

对图 2(b) 所示等效电路, 电感的等效阻抗为:

$$Z = (R_{\text{line}} + R_{\text{me}}) + j\omega L_s \quad (2)$$

因此, 电感 Q 值可表述为如下形式

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_{\text{line}} + R_{\text{me}}} \quad (3)$$

其中: ω 为线圈中信号的角频率, L_s 可以通过 Greenhouse 法进行计算^[3]. R_{line} 和 R_{me} 可通过系统分析高频下各种效应后计算.

对于应用在射频通信中的电感, 导体的趋肤效应将随着频率的升高而显著改变导体的导电特性. 高频下考虑趋肤效应时, 宽度为 b 、厚度为 τ 的矩形截面导电薄片单位长度的阻抗为^[4]:

$$Z_{\text{line}} = \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}} \times \frac{ch}{2d} (1+j) \times e^{j\pi/4} \quad (4)$$

d 为高频下导体的趋肤深度:

$$d = \sqrt{2 / \omega \mu \sigma} \quad (5)$$

式中: μ 为导体的磁导率, σ 为导体的电导率. 这样, 在已知金属线圈的材料、尺寸和工作频率之后, 就可以求出总阻抗, 从而求出:

$$R_{\text{line}} = \text{Re}(Z_{\text{line}}) \quad (6)$$

电感中传输的高频信号将会在金属导线中将产生涡旋感应电场, 这种涡流损耗将消耗大量信号能量, 等效为寄生电阻 R_{me} . 其物理原理分析如图 3 所示.

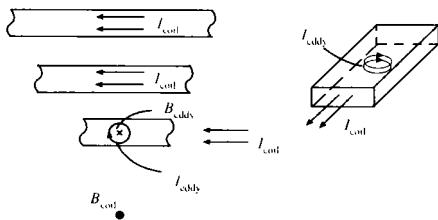


图 3 涡流的形成

I_{coil} 为电感线圈中的电流, 它将产生磁场 B_{coil} . 由于线圈中信号的频率很高, 所以 I_{coil} 和 B_{coil} 都以很高的频率变化. 在靠近中心处, 高频磁场从导体中穿过, 由法拉第电磁感应定律和楞次定律, 在线圈导线中就会产生感应电流 I_{eddy} 和感应磁场 B_{eddy} . 线圈越厚, 感应电流 I_{eddy} 就越大, 消耗的能量越多. 这

样就等效于一个寄生电阻 R_{me} , 其大小可精确计算^[4]. 这样, 微机械悬浮结构电感的各寄生元件均已求出, 即可求出电感的 Q 值.

使用 Matlab 得到了平面悬浮结构螺旋电感 Q 值的理论曲线, 如图 4 所示.

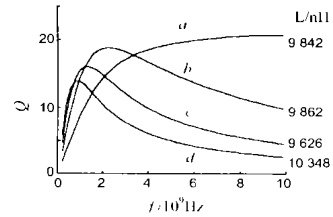


图 4 电感 Q 值与工作频率之间的关系

线圈匝数: 5.5 匝, 最内圈面积: $200 \times 200 \mu\text{m}^2$, 导线厚度: $5 \mu\text{m}$

导线宽度分别为: a: $5 \mu\text{m}$, b: $10 \mu\text{m}$, c: $15 \mu\text{m}$, d: $20 \mu\text{m}$

当频率较低的时候, 涡流效应的影响可忽略, 寄生电阻以 R_{line} 为主, 随频率变化较慢. 所以 Q 值受 $\omega \cdot L_s$ 的影响, 随频率的增高而上升. 由于横截面积大的导线具有更小的 R_{line} , 所以在频率较低的情况下导线横截面更宽或更厚的线圈具有更高的 Q 值. 当频率提高到一定程度之后, 涡流损耗寄生电阻 R_{me} 的作用逐渐明显, 总寄生电阻随频率的增高而显著增大, 此时, 电感的 Q 值将会随着频率的增高而下降. 同时, 横截面积小的导线中涡流损耗掉的能量较少, 使得导线具有更小的 R_{me} , 所以在频率较高的情况下导线横截面更窄或更薄的线圈具有更高的 Q 值.

从图 4 可得, 在 2GHz 的工作频率下, 当电感线圈导线的宽度为 $10 \mu\text{m}$ 时, 电感的 Q 值达最大.

4 工艺设计

为实现悬浮结构的 MEMS 电感, 我们使用多孔硅作为牺牲层材料, 这样可以实现单面工艺, 降低器件加工难度, 提高工艺可靠性, 同时实现与 CMOS 电路的单片集成.

4.1 多孔硅制备

多孔硅的制备采用将硅片放置于 HF 溶液中进行电化学阳极氧化的方法, 我们的实验采用了一种专用容器, 其结构如图 5 所示.

此阳极氧化容器由聚四氟乙烯制成. 硅片放置于固定板的孔内, 密封圈和固定板将整个容器完全分隔为两个部分, 两侧各放置一铂电极, 两个铂电极分别接直流稳压电源的正极和负极, 电流经溶液穿过硅片. 这样, 正对负电极

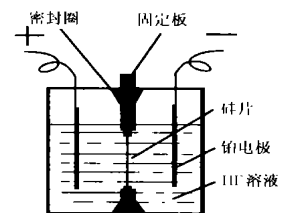


图 5 阳极氧化容器示意图

的硅片成为电化学反应的阳极, 生成多孔硅. 这种设计避免了在硅片背面镀导电层, 减小了工艺难度, 提高了兼容性.

为形成一定图形的多孔硅区域, 必须选取一定的材料作为阳极氧化过程中的掩膜. 从理论上讲, 任何不溶于氢氟酸的材料均可作为掩膜, 如氮化硅、碳化硅、贵金属及光刻胶

等^[5]. 在阳极氧化过程中, 用无水乙醇和氢氟酸配置溶液. 乙醇的存在可以减小表面张力, 加快氢气的释放. 对于作为牺牲层使用的多孔硅材料, 往往希望生成的多孔硅孔径小、表面平整, 从而便于在多孔硅上淀积不同的薄膜材料形成结构. 一般来讲, 对高掺杂 N 型硅片, 当固定阳极氧化的电流密度时, HF 浓度越高, 多孔硅的孔径越小; 当固定 HF 浓度时, 阳极氧化电流密度越小, 多孔硅的孔径越小^[6].

我们的实验样品为两组高掺杂单面抛光 N 型<100>硅片, 电阻率为 $0.01\Omega\cdot\text{cm}$, 掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 掩膜材料为氮化硅. 阳极氧化 10 分钟后, 形成了 $30\mu\text{m}$ 的多孔硅. 溶液配比方法为:

HF(40%): $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 3:1$ (体积比)

阳极氧化电流密度: $J = 40\text{mA}/\text{cm}^2$.

相同的反应时间下, 在高浓度的 HF 溶液中生成的多孔硅厚度大、孔径小、结构致密, 表面平滑, 适于作为 MEMS 器件的牺牲层.

4.2 多孔硅释放

任何体硅腐蚀液均可用于多孔硅的释放. 由于 KOH 溶液中的 K^+ 离子对 CMOS 电路有非常严重的污染, 同时 OH^- 离子会与电路中暴露的铝反应, 因此用 KOH 溶液进行多孔硅释放不利于实现 MEMS 器件和有源电路的兼容. TMAH (四甲基氢氧化铵) 溶液中不含碱金属离子, 而且无毒、不易挥发, 与其它体硅腐蚀溶液相比有明显优点. 同时, 在向 5% TMAH 溶液中加入硅粉 (1.4% 以上) 和 0.4%~0.6% 的过硫酸铵 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 后 (均为质量比), 可以在快速释放多孔硅牺牲层的不腐蚀电路中暴露的铝, 从而实现与 CMOS 电路的完全兼容^[7].

为在薄膜上制作悬浮结构器件, 多孔硅必须通过膜上的腐蚀孔进行释放. 如果腐蚀孔太小, 会增大多孔硅释放时的工艺难度, 而过大的腐蚀孔会造成支撑膜性能的下降. 因此, 我们选择大小为 $4 \times 8\mu\text{m}^2$ 的腐蚀孔,

孔的间距为 $8\mu\text{m}$. 这种加工方法不仅可以用于 MEMS 电感, 而且可以用于 MEMS 滤波器、波带等射频元件.

4.3 工艺流程

整个电感的制作工艺如图 6 所示. 硅片衬底为 N 型<100>硅片, 电阻率为 $0.01\Omega\cdot\text{cm}$. (1) 硅片上热氧化 200nm SiO_2 作为硅衬底与 Si_3N_4 之间的去应力层, 并用 LPCVD (低压化学气相淀积) 方法淀积 200nm Si_3N_4 作为阳极氧化阻挡层. (2) 通过反应离子刻蚀 (RIE) 的方法刻蚀出阳极氧化窗口. (3) 阳极氧化形成多孔硅. (4) 去除作为阻挡层和去应力层的 Si_3N_4 和 SiO_2 . (5) LPCVD 淀积 $1\mu\text{m}$ SiO_2 作为支撑膜. (6) 溅射 300nm 铝作为下层金属并刻蚀. (7) 用等离子增强化学气相淀积 (PECVD) 方法淀积 300nm Si_3N_4 作为两层金属之间的绝缘层. 并在两层金属接触区域刻蚀出接触孔. (8) 溅射 $1\mu\text{m}$ 铝作为上层金属, 并刻蚀. (9) 通过 RIE 刻蚀出多孔硅腐蚀孔. (10) 采用 TMAH 溶液从腐蚀孔中进行多孔硅释放, 溶液配比为: TMAH 5%, 硅粉 1.6%, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 0.6% (均为质量浓度).

5 工艺试验结果与讨论

以此工艺流程为基础的 MEMS 电感 SEM 照片如图 7 所示.

此电感总占用芯片面积为: $830 \times 500\mu\text{m}^2$, 其中, 线圈部分面积为 $395 \times 380\mu\text{m}^2$, 支撑膜面积为 $450 \times 425\mu\text{m}^2$ 厚度为 $1\mu\text{m}$. 图 8 显示了电感铝线圈拐角处的局部形状.

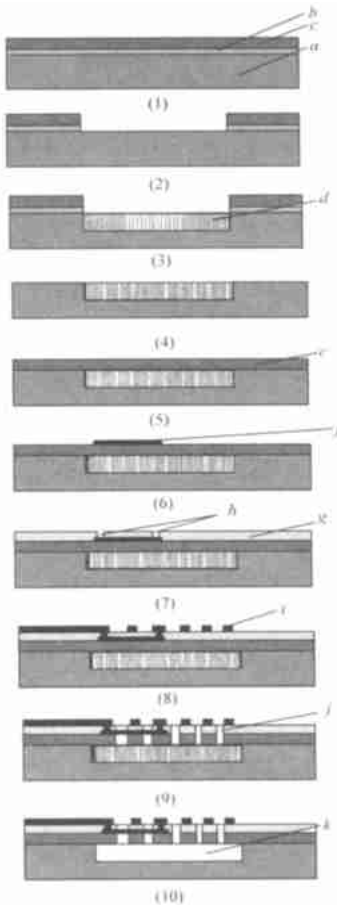


图 6 工艺流程示意图

a: 硅衬底; b: SiO_2 ; c: Si_3N_4 (LPCVD); d: 多孔硅; e: SiO_2 (LPCVD); f: 下层金属 (Al); g: Si_3N_4 (PECVD); h: 铝接触孔; i: 上层金属 (Al); j: 释放孔; k: 空气腔

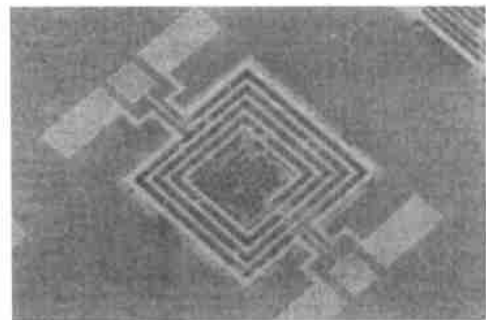


图 7 MEMS 电感 SEM 照片

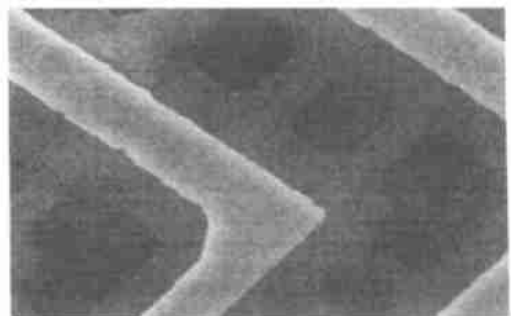


图 8 MEMS 电感铝导线 SEM 照片

电感线圈中, 铝导线的设计宽度为 $10\mu\text{m}$, 但由于用磷酸对铝进行湿法腐蚀过程中的侧向腐蚀, 实际得到的铝导线宽

度小于设计尺寸. 这一缺点可以通过采用干法腐蚀工艺得到克服.

在整个工艺流程中, 多孔硅的制备起非常重要的作用, 它的性能直接影响制作于其上方的薄膜质量, 从而影响整个 MEMS 器件的性能. 若多孔硅孔隙度太大, 则淀积到它上方的薄膜不平滑, 无法实现支撑膜的功能. 因此, 通常需要在高浓度的 HF 溶液中制备孔径小、结构致密、表面平滑的多孔硅. 但如果此 HF 溶液的浓度太高, 会造成阳极氧化阻挡层(氮化硅)被 HF 腐蚀, 改变阳极氧化的图形. 因此, 阳极氧化的溶液配比必须经过慎重考虑. 实验证明, 我们选择的阳极氧化条件(30% HF 溶液, 电流密度 $J = 40 \text{ mA/cm}^2$)适合于制作于牺牲层的多孔硅.

为保证悬浮结构支撑薄膜的质量, 需要在生成多孔硅之后, 将原来用于掩蔽的氮化硅去掉. 一般来说, 去除氮化硅的简单方法是用磷酸煮沸, 180 °C 条件下, 磷酸与氮化硅的反应速度(10 nm/min) 远远大于与硅的反应速度(约 0.3 nm/min)^[8], 因此, 磷酸煮沸完全可以满足一般的工艺要求. 但是由于多孔硅内部表面积大, 很容易和化学物质接触, 而且其内部结构疏松, 在去除氮化硅的同时磷酸很容易将多孔硅破坏. 我们曾用磷酸煮沸已生成了多孔硅样品, 煮沸 15 分钟之后, 发现氮化硅和多孔硅均已被腐蚀. 这样, 就无法在多孔硅上淀积支撑膜, 影响了后继工艺的实现. 一个可供替代的解决方案是在室温下将样品放置于稀 HF 溶液中, 经过长时间的浸泡后将氮化硅腐蚀, 或采用干法刻蚀去除氮化硅. 我们的实验中, 将样品放置于 10% HF 溶液中 2 个小时后, 衬底表面的氮化硅被腐蚀干净, 多孔硅没有明显变化. 这样通过选择对多孔硅影响小的药品进行腐蚀, 可以保证结构的质量.

在我们的实验中, 腐蚀孔尺寸为 $4 \times 8 \mu\text{m}^2$, 支撑膜厚度为 $1 \mu\text{m}$, 最大尺寸为 $2 \times 2 \text{ mm}^2$, TMAH 溶液最大侧向腐蚀距离为 $540 \mu\text{m}$. 由于 TMAH 溶液与 SiO_2 和 Si_3N_4 的反应速度远远小于其与硅的反应速度, 多孔硅的释放不会造成支撑膜的损坏^[9]. 结果证明, 厚度为 $30 \mu\text{m}$ 多孔硅被完全释放. 以此方式形成的空气层可以将衬底对 RF 器件的影响大大减小.

在整个工艺流程中, 所有 MEMS 工艺(阳极氧化及多孔硅释放)均不涉及碱金属离子, 不腐蚀电路中已经存在的元器件, 与 CMOS 电路完全兼容.

此电感结构及电学参数的测量正在进行, 所获结果和分析将另文发表.

6 结论

平面螺旋结构电感的 Q 值受多方面因素的影响, 使用微机械方法形成悬浮结构可以减小寄生效应. 对于已经去除衬底的电感, 其 Q 值可以用较简便的方法加以计算. 通过计算可以看到, 在不同的频率下, 存在一个使 Q 值最大的线圈几何尺寸. 采用多孔硅做牺牲层, 优化的阳极氧化条件是 30%

HF 溶液, 电流密度 $J = 40 \text{ mA/cm}^2$. 以 SiO_2 作为支撑膜, 采用添加了硅粉和过硫酸铵的 TMAH 溶液从腐蚀孔中释放牺牲层, 最终得到悬浮结构微机械平面螺旋电感, 其制作工艺流程与 CMOS 工艺完全兼容. 此工艺设计可以广泛应用于各种 RF MEMS 元件.

参考文献:

- [1] Yoon Jurr BO, Kim Borr Kee, et al. Surface micromachined solenoid on Si and on glass inductors for RF applications [J]. IEEE Electron Devices Letters, 1999, 20(9): 487-489.
- [2] Yue C Patrick, Wong S Simon. On-chip spiral inductors with patterned ground shields for Si based RF IC's [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 1998, 33(5): 743-751.
- [3] Greenhouse H M. Design of planar rectangular microelectronic inductors [J]. IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, 1974, PHP 10(2): 101-109.
- [4] 丁勇, 刘泽文, 刘理天, 等. 微机械平面螺旋电感 Q 值研究与结构优化研究 [J]. 清华大学学报, 2001, 41(7): 106-109.
- [5] Steiner P, Lang W. Micromachining applications of porous silicon [J]. Thin Solid Films, 1995, 255(1): 52-58.
- [6] 黄庆安. 微机械加工技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 30.
- [7] Yan Gui zhen, Chan Philip C H, et al. An improved TMAH Si etching solution without attacking exposed aluminum [A]. Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) [C]. Miyazaki, Japan: IEEE, 2000: 562-567.
- [8] Ghandhi S K. VLSI fabrication principles: silicon and gallium arsenide [M]. Chap 9, New York: Wiley, 1983: 496.
- [9] Osamu Tabata, Ryouji Asahi, et al. Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions [J]. Sensors and Actuators A, 1992, 34(1): 51-57.

作者简介:



丁勇男, 1977 年出生, 河南人. 1999 年毕业于清华大学电子工程系获工学学士学位, 现为清华大学微电子所硕士研究生, 从事 RF 电路及 RF MEMS 器件的研究工作.



刘泽文男, 1960 年出生, 安徽人. 法国巴黎南大学理学博士, 清华大学副教授, 微电子学研究所副所长, 主要研究领域微细加工技术, 微电子学和 MEMS 技术.