

针对功率MEMS器件而设计的高电感密度 3D MEMS片内螺线管电感器

Tiantong Xu, Jiamian Sun, Hanxiao Wu, Haiwang Li, Hanqing Li, Zhi Tao

北京航空航天大学能源与动力工程学院

波士顿麻省理工学院微系统技术实验室

摘要: 在本文中, 我们报告了3D电磁电感的设计和测量, 该电感嵌入在Si基板中并且可以集成铁芯。通过兼容CMOS的MEMS制造工艺, 我们制造出具有良好结构完整性和可重复性的各种电感器设计。电感器的平均电感和品质因数峰峰值变化低于10%, 这表明制造工艺是可重复的。在没有铁芯的电感器中, 5匝电感器达到最高品质因数(21MHz时为37.6), 20 Ω电感器中达到了最高的电感和电感密度(分别为86.6nH和21.7nH/mm²)。在铁芯电感器中, 15匝电感器的电感为1063nH, 电感密度为354.3nH/mm², 比不带铁芯的相同设计高近18倍, 据我们所知, 这是MEMS微电感的最高电感密度。这种类型的电感器是RF MEMS和电磁功率MEMS器件中的重要组件, 可以提高其性能和效率。

关键词: 电磁电感器, 功率MEMS, 高电感密度, CMOS兼容制造工艺

1 引言

电感器是电磁设备的最基本组件, 也是电子设备的基本组成部分。微电感器现在广泛用于微传感器、微致动器、RF MEMS和功率MEMS中。诸如变压器、能量收集器和电磁电动机之类的功率MEMS器件通常需要电感器具有高电感, 以实现功率密度, 并具有高质量系数以提高效率。

随着MEMS器件变得越来越紧凑, 它们还需要具有高电容量且紧凑物理尺寸的电感器。通过将所有电力电子组件集成到一个芯片中, 可以满足这些需求——更高的集成度将降低成本, 减少所需空间并提高功率密度。因此, 电感器制造工艺需要与CMOS兼容才能集成。已报道的CMOS兼容MEMS制造技术可以分为两类: 片上电感器和片内电感器。为了制造片上电感器, 表面微加工技术已经成熟并得到广泛使用。片内电感器可以利用未使用的基板体积, 并省去基板表面上方的电感器高度, 这使其更易于与CMOS器件集成。硅通孔技术是制造片内电感器的最可行方法。

由于高纵横比蚀刻和电镀对于构建片内电感器至关重要, 因此开发制造技术仍然是一个挑战。我们的小组已经报告了最近正在研究的硅嵌入式电感器的制造工艺和性能。

2 设计与制造

在我们的设计中(图1), 螺线管电感器通过深Si蚀刻和Cu电镀完全嵌入到硅基板中。硅钢铁芯位于铜电感器的中间。通过在硅基板和作为绝缘层的铜线圈之间进行硅热氧化来形成SiO₂层。

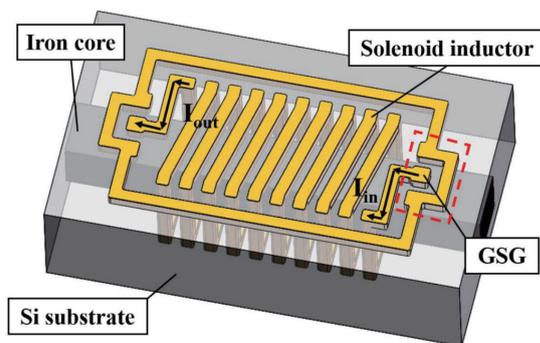


图1 电感器的结构。输入和输出电流由箭头指示。接地信号接地(GSG)焊盘可用于高频测量。

制造流程包括两个阶段(图2)。在第一阶段, 即硅蚀刻和键合阶段, 为螺线管电感器和铁芯创造了空间; 使用厚度为0.5毫米的双面抛光硅晶片(电阻率为3.7厘米)

作为衬底。该过程如下:

- 1) 用热氧化法在两面都形成 SiO₂ 层。
- 2) 在两侧涂覆 SPR700 光致抗蚀剂, 并使用 EVG 掩模对准器曝光水平沟槽、通孔和铁芯图案。
- 3) 执行缓冲氧化物蚀刻以去除暴露的氧化物层。
- 4) 在顶部涂上 AZ4620 光刻胶, 并露出通孔图案。
- 5) 用感应耦合等离子体系统蚀刻通孔。
- 6) 使用食人鱼溶液去除光刻胶。
- 7) 使用 SiO₂ 作为掩膜层, 在顶部蚀刻通孔和水平沟槽图案, 在背面蚀刻铁芯和通孔图案。
- 8) 使用稀释的 HF 溶液去除所有的 SiO₂ 层。
- 9) 使用黏合剂 (EVG Co.) 进行硅直接键合工艺, 以在基板内部形成铁芯空间。

在第二阶段, 即铜填充阶段, 采用电镀工艺制造铜线圈。该过程如下。

- 10) 使用热氧化法产生厚的 SiO₂ 层, 作为电感器和基板之间的隔离层。
- 11) 使用磁控溅射系统 (Denton Vacuum Co.) 在背面溅射铜 (以 Ni 为中间层) 作为籽晶层。

12) 进行铜电镀, 直至其填充水平沟槽并密封背面的通孔。

13) 覆盖背面, 防止在该面进一步电镀铜。进行“自下而上”的通孔电镀工艺以填充通孔和顶部水平沟槽。

14) 使用研磨机 (Logitech Co.) 除去生长在基板表面上方的 Cu。

15) 使用切割机 (Disco Co.) 分离每个电感器结构。在电磁电感的中心插入铁芯 (中国宝武钢铁有限公司)。

3 实验结果

我们成功制造了八种不同的螺线管电感器, 并具有良好的结构完整性 (图 3a)。电感具有四个不同的匝数 (5/10/15/20) 和两个不同的宽度 (0.5/1mm)。电感器的高度为 1mm, 铜线圈的横截面是边长为 100μm 的正方形, 并且线圈之间的间隙也为 100μm。

为了更清楚地检查电感螺线管的固体结构, 通过在 75°C 的 25% 四甲基氢氧化铵 (TMAH) 溶液中进行蚀刻, 去除了 10 匝电感器的硅基板。然后将样品转移到 Zeiss EVO 18 扫描电子显微镜进行进一步观察 (图 3c)。结果

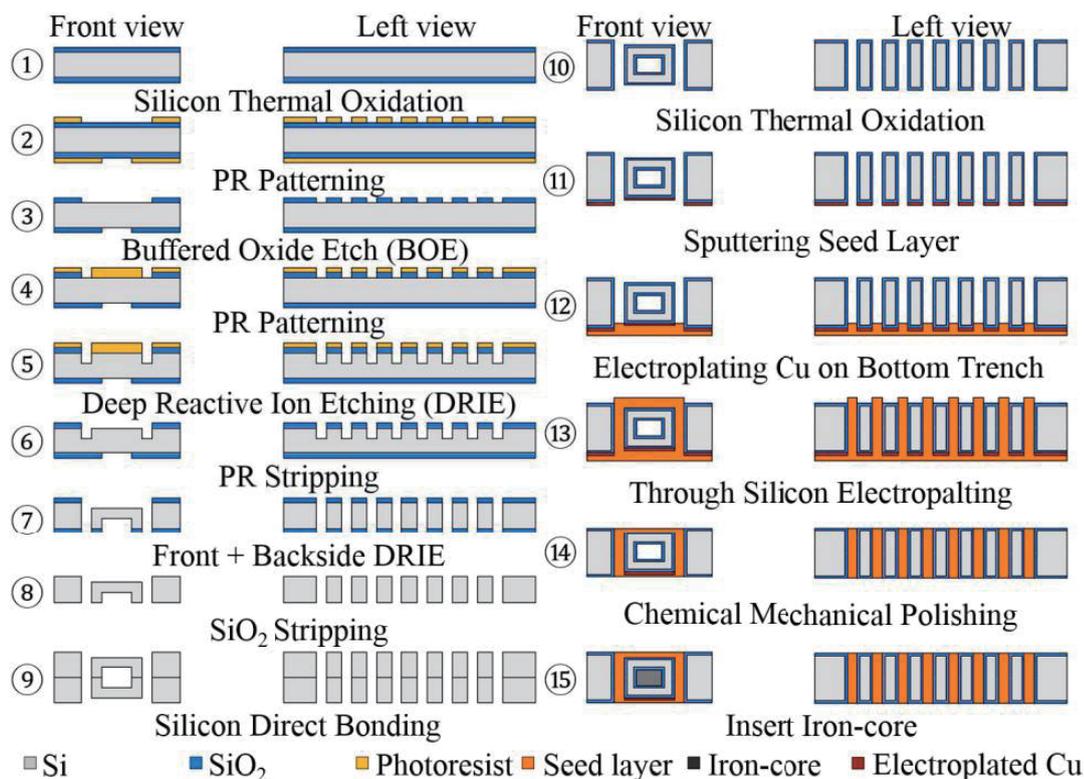


图 2 电感制造流程。

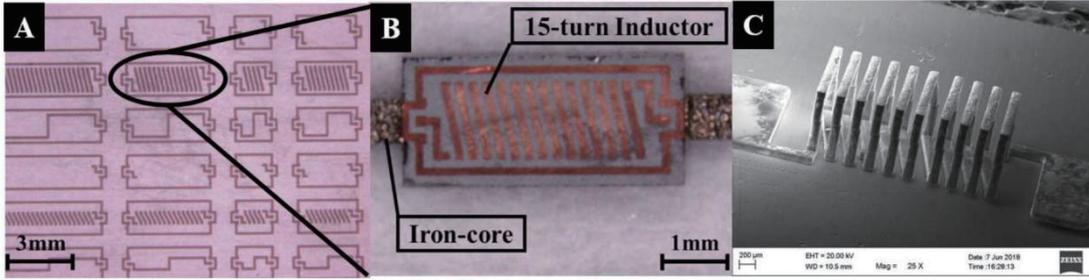


图3 (a) 切块和插入铁芯之前的电感器的平面图。(b) 切成后的15匝电感(有铁芯)。(c) 在扫描电镜下的整个外露电磁线圈结构。

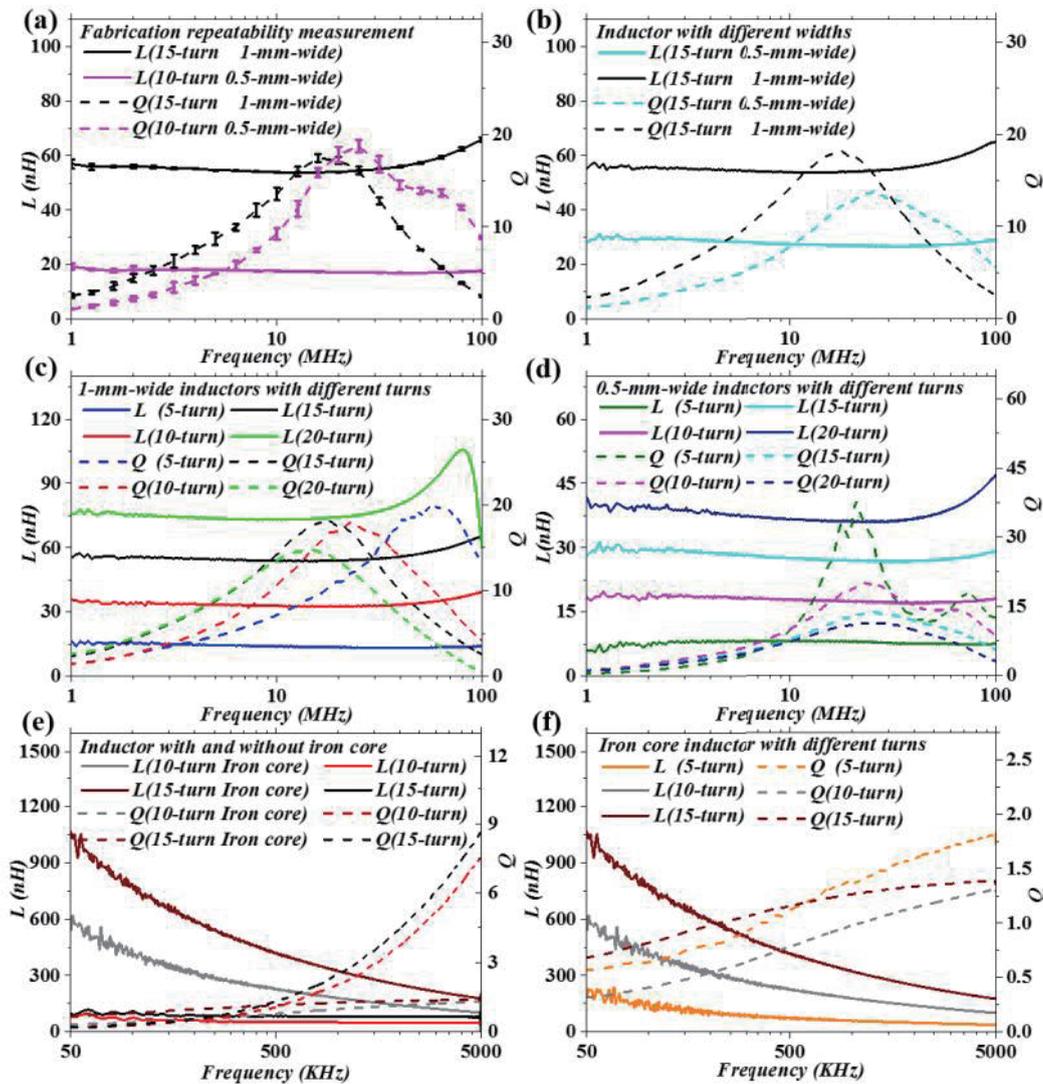


图4 选定的片内螺旋管电感器的频率相关电感(L)和品质因数(Q)值。(a) 制造重复性测量:测试了来自三个不同工艺运行的两个电感器设计,并绘制了平均值和误差线。(b) 比较不同宽度的电感器。(c) 比较不同匝数的1mm宽电感器。(d) 比较不同匝数的0.5mm宽电感器。(e) 带有和不带有铁芯的电感器的比较。(f) 比较不同匝数的1毫米宽铁芯电感器。

表明, 电感器的结构形态与设计模式基本相同, 结构完整性良好。

为了测试这些电感器的性能, 我们使用了 Agilent N5290A 矢量网络分析仪。测试探针是 Cascade ACP40-GSG-250 空气共面探针, 以及 Cascade Summit 12K 探针台。

首先, 测量了不带铁芯的片内螺线管电感器的性能 (图 3a)。测试频率范围是 1MHz 至 100MHz; 定期以 0.05MHz 的间隔进行测量 (1981 总测量值)。

图 4 (a) 显示了两种电感器设计的制造重复性测量。对于每种设计, 我们测量了来自不同工艺运行的三个电感器。对于所有测量点, 15 匝 1mm 宽电感器的平均峰峰值变化为: 电感为 3.07%, 品质因数为 5.93%; 10 匝 0.5mm 宽电感器的平均峰峰值变化为: 电感为 6.90%, 品质因数为 7.13%。这些相对小的变化表明制造工艺是稳定且可重复的。

图 4 (b) 和 (c) 比较了不同匝数的电感器的电磁性能。在 5 匝电感器中发现了最高的 Q 值, 在 21MHz 时其 Q 峰值为 37.6, 电感为 8.17nH; 在 20 匝电感器中发现最高的电感密度, 其中电感密度为 21.7nH/mm², 电感为 86.6nH, 而峰值 Q_{wa} 在 14.6MHz 时为 14.7。图 4(d) 显示了宽度对电感性能的影响。表 I 列出了每种电感器设计的性能细节。

随后, 将硅钢铁芯插入螺线管电感器中, 并测量铁芯螺线管电感器的性能。由于硅钢的性能在更高的频率下会明显降低, 因此我们将测试频率范围减小到 0.05-5MHz, 并以 0.05MHz 的固定间隔进行测量 (总共有 500 个数据点)。

图 4 (e) 比较了两种设计在插入铁芯之前和之后的电磁性能。铁芯显著提高了电感和电感密度。对于 15 匝 1mm 宽的电感器, 插入铁芯后的电感为 1063nH, 电感密度为 354.3nH/mm², 比不带铁芯的相同设计高近 18 倍。但是, 硅钢会在高频下产生较大的感应电流, 并导致严重的涡流损耗, 从而使电感器的品质因数降低。在所有测量中, 硅钢铁芯电感器的品质因数约为 1。未来, 我们将尝试用铁氧体代替硅钢芯, 以减少高频时的涡流损耗。图 4 (f) 比较了不同匝数的铁芯电感器。在此, 感应的增加率高于匝数的增加率。表 II 中列出了带有和不带有铁芯的所选电感器的性能细节。

图 5 (a) 显示了 15 匝 1mm 宽电感器的等效电路模型。在此模型中, R₀ 和 L₀ 是理论串联电阻和电感。L₁ 和 R₁ 的组合表示由于趋肤效应和邻近效应而导致的频率变化。C_{ox} 代表金属段和衬底之间的耦合电容。

C_s 代表金属段不同部分之间的寄生电容, R_c 代表耐基板损耗性。R_{sub} 和 C_{sub} 的组合表示电感器和接地金属之间的寄生电容。提取的电感集总电路参数如图 5 (a) 所示。

表 I 不带铁心和带铁心的电感器的电磁性能

Turns	Width (mm)	Q_{peak} @frequency (MHz)	$Q > 5$ frequency (MHz)	L (nH) ($Q > 5$)	$L_{density}$ (nH/mm ²)
5	0.5	37.6 @ 21.0	6.5–100	7.33–8.17	14.7–16.3
10	0.5	20.1 @ 23.0	4.45–100	16.8–18.7	16.8–18.7
15	0.5	13.8 @ 25.2	5.7–100	26.5–29.0	17.7–19.3
20	0.5	11.4 @ 24.25	6.05–79.9	35.8–42.4	17.9–21.2
5	1	19.8 @ 59.85	5.7–100	13.4–14.6	13.4–14.6
10	1	18.0 @ 22.6	4.15–90.4	32.6–38.3	16.3–19.2
15	1	18.2 @ 17.5	2.35–68.75	53.9–60.0	18.0–20.0
20	1	14.7 @ 14.6	2.3–51.05	73.3–86.6	18.3–21.7

表 II 不带铁心和带铁心的电感器的电磁性能

Turns	Without iron core			With iron core		
	Q_{peak} @frequency (MHz)	L (nH) ($Q > 5$)	$L_{density}$ (nH/mm ²)	Q (0.05–5 MHz)	L (nH) @0.05 MHz	$L_{density}$ (nH/mm ²)
5	19.8@59.85	14.6	14.6	0.57–1.74	229.5	229.5
10	18.0@22.6	38.3	19.2	0.31–1.28	620.8	310.4
15	18.2@17.5	60	20	0.68–1.31	1063	354.3

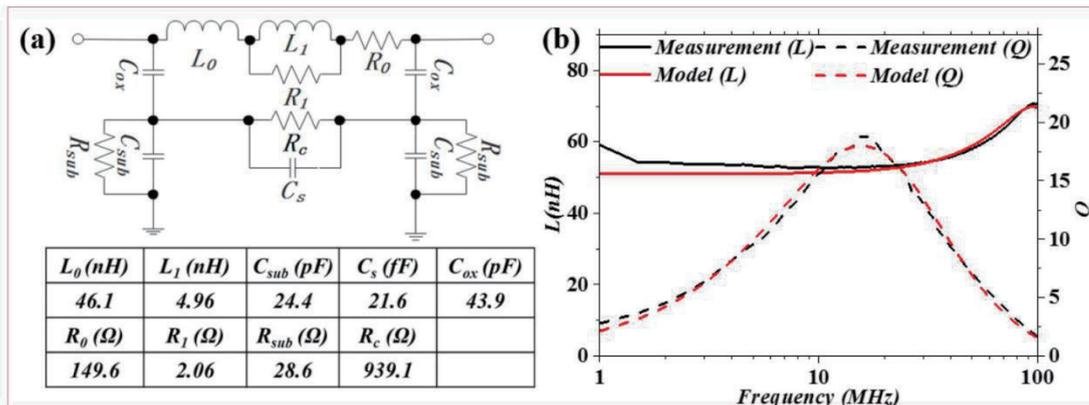


图 5 15 匝 1mm 宽电感器的等效电路模型。(a) 等效电路和提取的参数。(b) 比较测得的和建模的参数。

图 5 (b) 比较了测量参数和建模参数。结果表明, 建模参数与测量结果吻合良好。

4 结论

在本文中, 我们报告了一种 3D 电磁电感的设计, 该电感嵌入在基板中并且可以集成铁芯。该制造工艺是与 CMOS 兼容的, 在将电感器制造在硅基板上之后, 可以执行任何标准的 CMOS 工艺。我们制造了八种具有良好结构完整性和可重复性的电感器设计。

在没有铁芯的电感器中, 5 匝电感器达到了最高的品

质因数 (21MHz 时为 37.6), 20- Ω 电感器达到了最高的电感和电感密度 (分别为 86.6nH 和 21.7nH/mm²)。对于铁芯电感器, 15 匝结构发现电感为 1063nH, 电感密度为 354.3nH/mm², 这是迄今我们所知 MEMS 电感器的最高电感密度。

基于该电感器的结构和性能特点, 我们认为该片内螺旋管电感器可用于功率 MEMS 器件, 从而提高了这些器件的功率密度和效率。我们计划在不久的将来设计和研究基于此类电感器的微型变压器、微型振动能量收集器和微型电磁电动机。