

High Q MEMS Inductor for RF Power Delivery *

CHEN Shi-qing¹, LI Dan¹, LI Xiurhan^{1,2}, ZHANG Hai-xia^{1*}

1. National Key Laboratory of Nano/ Micro Fabrication Technology, Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100781, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University Beijing 100044, China

Abstract : A high Q inductor is designed and fabricated utilizing MEMS technology for RF power delivery system. The inductor structure is simulated and optimized by ANSOFT HFSS. In order to improve the Q factor, glass wafer is used as the substrate according to its high resistivity. A copper layer of 0.5 μm thick is sputtered and stripped to form the underpass. A SiO₂ film of 1 μm is deposited by PECVD, which acts as the dielectric layer. The inductor is patterned with thick photoresist and formed by copper electroplating with the thickness of 22 μm . This fabrication process is simple and easily to be integrated with IC. The measured results show that the micro inductor is about 55 nH and the maximum quality factor of 25 at the operating frequency of 1 GHz.

Key words : Micro inductor ; MEMS ; Power delivery ; Electroplating

EEACC :2575 ;2140

适用于 RF MEMS 能量耦合传输的高 Q 值电感 *

陈石清¹, 李 旦¹, 李修函^{1,2}, 张海霞^{1*}

1. 北京大学微电子学研究院微米/ 纳米加工技术国家级重点实验室, 北京 100871 ;
2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

摘 要 : 利用 MEMS 微电镀工艺技术制作了一种新型的适用于 RF MEMS 能量耦合传输的高 Q 值电感, 采用 ANSOFT 公司的 HFSS 优化平面螺旋电感的结构。在具有高电阻率的玻璃衬底上溅射 0.5 μm 的铜层作为下电极; PECVD 淀积厚度为 1 μm SiO₂ 作为中介介质层; 在介质层上结合厚胶光刻技术电镀厚为 22 μm 的铜作为电感线圈。这套电感制作工艺简单、易于与 IC 制备工艺集成。本文制备的微机械电感在微型植入系统中具有广阔的应用前景。测量结果表明: 当工作频率在 1 GHz 左右时, 微电感的电感值达到 55 nH, Q 值最大可达到 25。

关键词 : 微电感; MEMS; 能量耦合; 电镀

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)04-0604-03

对微型植入式系统和传感器网络进行能量传递是 RF MEMS 技术的一个重要应用领域^[1], 如图 1 所示为电感耦合传递能量系统框架图。在电感耦合传递能量系统中, 耦合线圈的设计是系统设计的关键, 高 Q 值电感是提高耦合效率的重要因素。Heetderks 等^[2]证明了毫米和亚毫米量级的电感线圈可以传递毫瓦量级的功率。PCB 板上印刷平面电感^[3]用于耦合能量传递的研究较多, 但 PCB 电感的 Q 值都较低, 难以实现高效的能量传递。

利用微细加工工艺制备的 MEMS 电感^[4]与传统

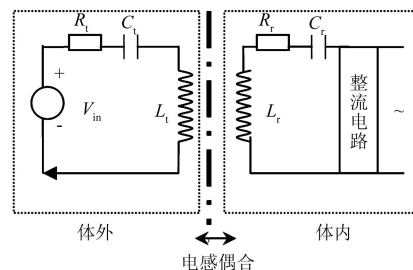


图 1 体内与体外电感能量耦合系统框架图
方法制备的电感相比, 具有 Q 值更高、体积小、功耗低和易于集成化等优点, 因此更适合在微型植入系统中

基金项目: 国家 863 计划资助(2006AA04Z359); 自然科学基金海外青年学者基金资助(60528009)

收稿日期: 2007-04-30 修改日期: 2008-03-08

应用^[5]。基于以上特点,本文开展了 MEMS 高 Q 值电感^[6]的研究,首先采用 ANSOFT 公司的 HFSS 优化平面螺旋电感的结构。在玻璃衬底^[7]上溅射 0.5 μm 的铜层作为下电极;PECVD 淀积厚度为 1 μm 的 SiO₂ 作为中间介质层;在介质层上电镀厚为 22 μm 的铜作为电感线圈。经测试其当工作频率在 1 GHz 左右时,此微电感电感量达到 55 nH,Q 值最大可达到 25。

1 射频电感的设计

射频电感的设计参数^[8]主要包括电感外径 D_{out} ,线圈匝数 N ,线宽度 W ,线间距 S 。采用 HFSS 建模,对微电感的上述参数进行优化设计,优化了电感值为 50 nH 的电感线圈,如图 2 是利用 HFSS 建模的电感模型。表 1 列出了 50 nH 电感值下的电感最优设计参数,并且给出电感工作的最佳工作频段及相应的最高 Q 值。在电感的外径为 1.2 mm、匝数是 10 匝、线条的间距和宽度分别为 40 μm 和 20 μm 时,电感的最佳工作频段为 400 ~ 600 MHz,最高的 Q 值为 25.3,电感的自谐振频率为 1.7 GHz。

表 1 能量耦合高 Q 值 RF 微电感的优化设计参数

参数	典型值
电感值/ nH	50
D_{out} / mm	1.2
N / 匝	10
W / μm	20
S / μm	40
最高 Q 值	25.3
自谐振频率/ GHz	1.7
最佳工作频段/ MHz	400-600

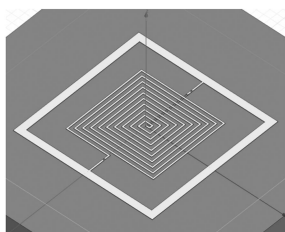


图 2 HFSS 建模的电感模型

2 射频电感的制作工艺

本文采用微机械加工与电镀铜相结合的方法制备高 Q 值 MEMS 电感。制备的工艺流程如图 3 所示。

- (1) 首先在衬底玻璃片上溅射厚度为 500 nm 的 Cu,剥离后得到金属下电极;
- (2) PECVD 淀积一层厚度为 1 μm SiO₂ 介质层作为一二层金属的绝缘介质层;
- (3) 刻蚀 SiO₂ 得到一二层金属连接的接触孔:在刻蚀接触孔时,先用 RIE 干法刻蚀 SiO₂ 800 nm;然后用 BHF 湿法刻蚀剩余的 SiO₂;

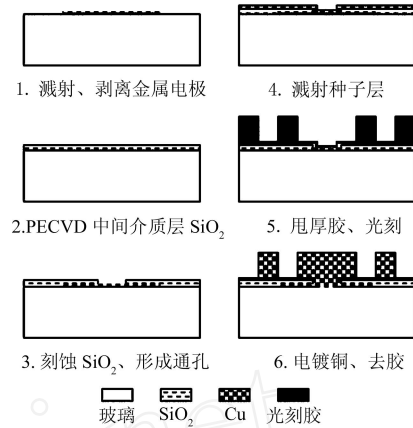


图 3 微电感制作工艺过程

- (4) 在基片上溅射厚度为 130 nm 的 Ti/ Cu 作为电镀金属铜的种子层 (Ti/ Cu = 30 nm/ 100 nm);
- (5) 利用连续甩两次 AZ4620 型光刻胶的方法,得到厚度为 25 μm 的胶(匀胶速率为低速 600 rpm 甩 6 s,高速 2 000 rpm 甩 60 s;110 °C 下烘胶 120 s)。然后光刻、显影后得到微电感的图形;
- (6) 采用硫酸盐镀铜工艺制备厚度为 22 μm 的上层线圈,其中电流密度为 3 ASD,电镀温度为 20 ~ 40 °C 之间,在电镀过程中不停搅拌溶液,以加快沉积速度和保证电镀的均匀性。

最后,将所有光刻胶和种子层去除,其中,光刻胶利用丙酮去除;种子层 Cu 利用腐蚀液 (HAC 双氧水 去离子水 = 1 1 20) 去除,去种子层 Ti 采用 Ti 腐蚀液 (HF 去离子水 = 1 60)。

图 4 为采用上述工艺步骤制作的电感值是 55 nH 微电感电镜照片。图中,A 是电镀的电感线圈,B 是下层引线,C 是中间连接块,D 是共面波导线。

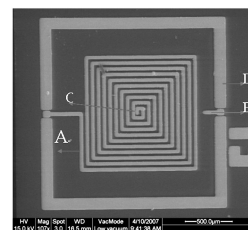


图 4 55 nH 微电感电镜照片

图 5 给出微电感电镀线条的局部光学显微镜照片,可以看出电镀电感的线条均匀、结晶细致。

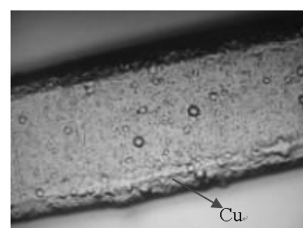


图 5 电镀局部光学显微镜照片

3 测试结果与讨论

微电感的测试在芯片测试平台上进行。测试平台由 Cascade 探针台、高频探针、以及安捷伦的 E8362B(扫频范围 10 MHz ~ 20 GHz)网络分析仪组成。首先通过在衬底接触(Contact_ Substrate)划痕对高频探针进行校平,保证探针头在同一个平面;然后通过接触标准衬底阻抗(Impedance Standard Substrate)校准测试系统。由于焊盘与焊盘,以及微电感的连接线之间都会存在寄生效应,影响测试的准确度,因此测试过程采用 De-embedding 方法。即测试焊盘之间连接电感,短路,断路三种结构的 S 参数,通过 ADS 对测试数据进行处理,最终得到相对精确的微电感的 L, Q 值。L, Q 的计算公式为:

$$L = \frac{\text{Im}(1/Y_{12})}{2f} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\text{Im}(1/Y_{12})}{\text{Re}(1/Y_{12})} \quad (2)$$

图 6 和图 7 分别列出了电感设计值为 55 nH 的微电感的 L 和 Q 测试曲线。

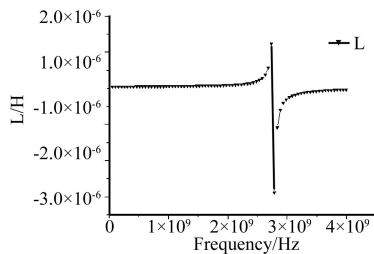


图 6 电感值为 55 nH 的 L 值测试曲线

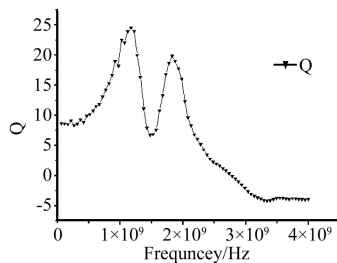


图 7 电感值为 55 nH 的 Q 值测试曲线

由图 6 可见,电感的自谐振频率为 2.7 GHz。对比图 6 和图 7,可以看出当电感的工作频率在 1 GHz

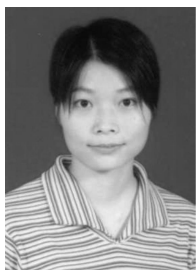
左右时,微电感的电感值达到 55 nH, Q 值最大可达到 25,与 HFSS 模拟结论基本吻合。

4 结论

本文利用 MEMS 工艺制作了一种适用于微型植入式系统来进行能量耦合传输的 RF 微电感。在玻璃衬底上溅射 0.5 μm 铜层作为下电极, SiO₂ 作为隔离层,电镀 22 μm 厚的铜层来制作微电感。经测试得出本文设计的微机械电感自谐振频率为 2.7 GHz, Q 值 1 GHz 左右最大可达到 25,与模拟结论基本吻合。这套制备微电感工艺简单、易于实现,且其最大的优势在于可与集成电路工艺相兼容,为微型植入式系统的集成化和广泛应用打下了坚实的基础。

参考文献:

- [1] Kopparthi and Ajmera P K. Power Delivery for Remotely Located Microsystems[C]// Proc. of 2004 IEEE Region 4 Annual Technical & Leadership Workshop, Norman, April 2-4, 2004:31-39.
- [2] W. J. Heetderks, 'RF Powering of Millimeter- and Submillimeter-Sized Neural Prosthetic Implants[J]. IEEE Trans. On Biomedical Engineering, 1988, Vol. 35:323-327.
- [3] Wang G, Liu W, et al. Design and Analysis of an Adaptive Transcutaneous Power Telemetry for Biomedical Implants[J]. IEEE Trans. Circuits and systems-I, 2005, vol. 52:2109-2117.
- [4] Pham N P, Sarro P M, Ng K T, and Bughartz J N. IC-Compatible Two-Level Bulk Micro-Machining Process Module for RF Silicon Technology[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2001; 48:1756-1764.
- [5] Katehi L P B, Harvey J F, Herrick K J. 3 D Integration of RF Circuits Using Si Micromachining[J]. IEEE Microwave Mag, 2001, 2(1):30-39.
- [6] Richards R J, De Los Santos H J. MEMS for RF/ Microwave Wireless Applications: the Next Wave[J]. Microwave J, 2001, (44):20-41.
- [7] Yoon J B, Kim B K, Han C H, Yoon E, Lee K, and Kim C K. Micromachined High-Q Overhang Inductors Fabricated on Silicon and Glass Substrates[C]// IEDM Tech. Dig., 1999:753-756.
- [8] Yue C P, Ryu C, Lau J, et al. A Physical Model for Planar Spiral Inductors on Silicon[C]// Proceedings of Int Electron Devices. Stanford(USA): Int Electron Devices Meeting, 1996:155-158.



陈石清(1979-),女,硕士研究生,研究方向为微电子机械系统(MEMS), helenqing @163.com.



张海霞(1970-),女,教授,北京大学微电子学研究院,长期从事微机电系统方向的研究,涉及微机电系统设计、加工和器件的研究,纳米加工与测试技术等。先后承担多项国家自然科学基金、863、973 计划等项目, zhanghx @ime.pku.edu.cn.