

柔性螺旋电感的射频特性分析及建模表征^{*}

徐艳蒙 秦国轩

(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

摘要:介绍了基于低成本塑料基体的柔性螺旋电感的制造工艺、射频特性分析及建模表征。柔性电感与传统的硅基体的螺旋电感性能相比性能更具有优势,电感值为 6.2 nH 的柔性电感的 Q 值最大值为 14.2,自振频率达到了 9.2 GHz。并提出了表征柔性平面螺旋电感的等效电路模型,模型仿真数据与实验数据取得了一致性。最后通过模型参数的仿真分析提出了优化柔性电感性能的方案。该研究为柔性电感的设计与应用提供了指导依据。

关键词:柔性器件;工艺制造;电感;建模;塑料衬底

中图分类号: TN405;TN61 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1035

RF characterization and modeling of flexible spiral inductors

Xu Yanmeng Qin Guoxuan

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper reports the realization, radio frequency characterization and modeling of flexible spiral inductors on low cost, flexible plastic substrates. The spiral inductor on plastic substrate exhibits better performance compared to the one on conventional silicon substrates. The peak Q value of the 6.2 nH flexible spiral inductor is 14.2 and the self-resonant frequency is up to 9.2 GHz. An equivalent circuit model of flexible spiral inductors on plastic is presented. And the equivalent circuit model achieves good agreement with the experimental results. The optimization methods of improving the performance of flexible spiral inductors are presented by the simulation of model parameters. The study provides guidelines for properly designing and using spiral inductors in flexible circuits and systems.

Keywords: flexible devices; process fabrication; inductors; modeling; plastic substrate

1 引言

近年来,高速柔性电子以其结构轻薄、可弯曲折叠、机械性能稳定、低成本制造工艺以及应用范围广等特点得到国内外广泛关注和研究。其可应用在个人 Wi-Fi 设备,可穿戴设备,远距离射频识别标签等^[1-3]。

目前已经研究出了柔性微波二极管、柔性薄膜晶体管、柔性电容以及柔性射频开关等高速柔性器件电路,这表明在塑料衬底上制作柔性微波集成电路有很大的发展前景^[4-6]。为了建立柔性高速微波射频电路与系统,可工作在高频的电感是不可或缺的无源器件。尽管已经有些电感制作在聚酰亚胺衬底上,但是它们在相对低频工作范围内,而且其印刷制造工艺不能与柔性有源器件 TFT 单片集成^[7-8]。另一些制作在塑料基体的电感为曲折型,电感值较低,占用面积较大^[6]。为准确高效地设计柔性微波集成电路,柔性螺旋电感的特性研究及其等效电路模型是至关重

要的。

本文首先介绍了柔性电感的制造工艺,将柔性螺旋电感与传统硅基体螺旋电感进行了性能比较,对柔性螺旋电感建立了射频等效电路模型,并提出了优化柔性电感性能的方案。

2 柔性螺旋电感的制备

首先在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)衬底(125 μm)上进行光刻,将 30/400 nm 的 Ti/Au 金属用电子束蒸发法淀积在 PET 衬底上并剥离。这层金属(M1)作为螺旋电感的中心电极。对于螺旋电感,金属间介质层的介电常数越小越会减小寄生电容从而提高电感的工作频率。为此,本文选用了 SU-8($\epsilon_r = 3.0$)作为平面螺旋电感的金属间介质层。将 SU-8 均匀旋涂在表面随后进行光刻形成通孔连接电感的中心电极金属。然后将 SU-8 在紫外线照射 45 s 并在 115 °C 下进行硬烘焙至交联状态。最后利用电子束蒸发淀

收稿日期:2015-10

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61376082)、天津自然科学基金(13JCZDJC25900)资助项目

积一层 30 nm/1.5 μm 的 Ti/Au(M2)作为电感的螺旋线圈和金属互连线。

基于柔性衬底的平面螺旋电感由两层金属和一层介质层构成,厚度约为 4 μm,这种薄的平面结构使得器件具有极大的抗机械弯曲能力。图 1 所示为柔性螺旋电感的截面示意图。具体所设计的柔性螺旋电感的版图参数与工艺参数如表 1 所示。图 2 所示为制造出的柔性螺旋电感的光学显微镜照片。

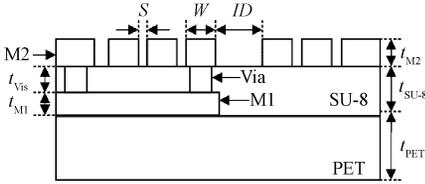


图 1 柔性螺旋电感的截面示意

表 1 柔性螺旋电感的工艺及版图参数

参数	含义	参数值	
t_{M2}	M2 层金属厚度	1.53 μm	
t_{Via}	通孔高度	1.07 μm	
工艺参数 t_{SU-8}	介质层厚度	1.5 μm	
t_{M1}	M2 层金属厚度	0.43 μm	
t_{PET}	衬底厚度	125 μm	
版图参数	W	线圈宽度	15 μm
	S	间距	4 μm
	N	圈数	4, 5
	ID	内径	130 μm

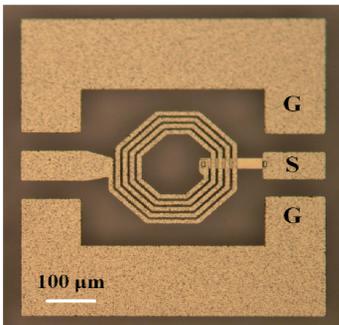


图 2 柔性螺旋电感的光学显微镜照片

3 柔性螺旋电感的特性分析

本文使用安捷伦 E8364A 网络分析仪和 GSG 探针针对制造的柔性电感进行了射频测试^[9]。此外采用 HFSS 电磁仿真软件对该电感进行了建模及电磁仿真^[10]。实验数据与仿真数据的结果如图 3 所示。一般采用电感值 L 、品质因子 Q 和自振频率 SRF 来表征电感的性能。其中, L 值和 Q 值由 S 参数转化为 Y 参数再经以下公式推导得出^[11]：

$$L = \frac{\text{im}(1/Y_{11})}{2\pi \cdot f} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\text{im}(Y_{11})}{\text{re}(Y_{11})} \quad (2)$$

式中: Y_{11} 为 Y 参数的分量, f 为频率。自振频率的定义为电感品质因子为零时的频率,即感性电抗和寄生的容性电抗幅度相等、相位相反。由图 3 可以看出,电磁仿真结果与实验数据吻合良好。

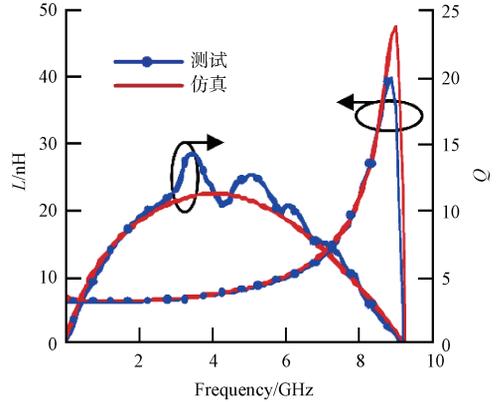


图 3 柔性螺旋电感的性能测试数据与仿真数据对比

柔性器件与传统的硅基体器件相比,有着可弯曲、质量轻等优势,为研究其性能的差异,本文在 HFSS 仿真软件中分别对基于传统的掺杂硅衬底、高阻硅衬底的电感进行了建模仿真。其中硅衬底的厚度为 500 μm,硅衬底的电阻率分别为 $\rho_{sub} < 5.0 \Omega \cdot \text{cm}$, $\rho_{sub} > 1000 \Omega \cdot \text{cm}$,氧化层即 SiO_2 层的厚度为 4.5 μm^[12]。从图 4(a)可以看出在低频时 L 值基本不变,而柔性电感的自振频率远大于基于掺杂硅衬底的电感,基于高阻硅衬底的电感自振频率位于两者之间。由图 4(b) 可以得出在高频时柔性电感的品质因子最高,这是由于柔性衬底属于绝缘性衬底,大大减小了衬底损耗。因此,柔性电感较于传统的硅基体的电感有着更优的性能表现。

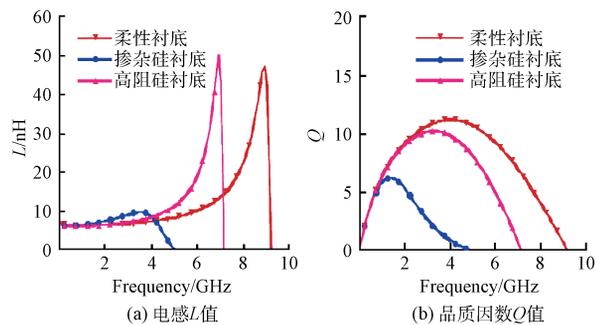


图 4 柔性电感与传统硅衬底电感的性能对比

4 柔性电感的等效模型建立

为快速、精确地对柔性螺旋电感进行分析和仿真,就必

须要建立柔性螺旋电感的等效电路模型,即要得到一种便于设计者使用的集总参数模型^[13]。目前,国内外许多研究机构都对平面电感的等效电路模型展开了研究。图5所示即为片上电感最常用的两端口的 π 型等效电路模型。其中 L_s 代表电感本身的自感和互感, R_s 代表电感的串联电阻, C_s 主要来源于螺旋线圈之间的电容和螺旋线圈与中心电极引线之间的交叠电容。 C_{OX} 表示电感线圈和衬底之间的耦合电容, C_{SUB} 和 R_{SUB} 分别表示衬底的电容和电阻^[13]。然而受到高频下趋肤效应和邻近效应的影响,该电感模型已不能精确表征电感的射频特性。

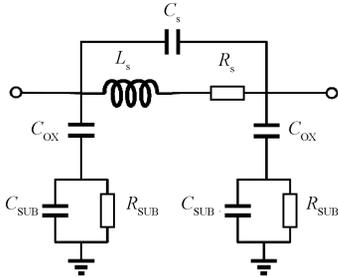


图5 螺旋电感的等效电路模型

为探究准确表征柔性螺旋电感的等效电感模型,本文采用了在原有的模型中加入了 R_0 、 L_0 元件的方法来表征趋肤效应和邻近效应^[14-15],并且考虑到柔性电感的衬底为绝缘性衬底,表征衬底寄生电阻的 R_{SUB} 为无穷大,可以考虑忽略。综上考虑,本文给出了基于塑料基体上的柔性螺旋电感的等效电路模型,如图6所示。并在ADS软件中对该模型与实验数据进行了数据拟合。在模型拟合过程中,首先在ADS中建立该集总模型等效电路,然后将柔性螺旋电感的仿真数据导入ADS,并对该模型中的各参数进行了提取,具体参数值如表2所示。由图6可看出模型的仿真结果与测试结果得到了良好的吻合。由此证明,该模型可以准确地表征柔性螺旋电感的性能,为塑料基体上的柔性螺旋电感的设计与应用提供指导依据。

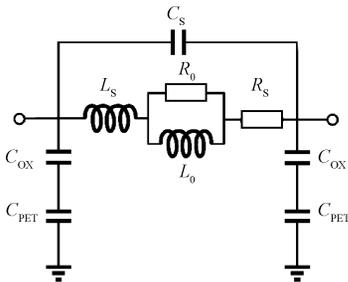


图6 柔性螺旋电感的等效电路模型

表2 柔性螺旋电感等效电路模型的参数

L_s /nH	R_s /Ω	C_s /fF	L_0 /nH	R_0 /Ω	C_{OX} /fF	C_{PET} /fF
6.18	6.7	19.8	0.16	2.3	64	50

为进一步探究提升柔性电感性能的方案,在ADS软件中仿真了主要的模型参数对电感性能的影响。首先在其他参数一定时仿真了不同 C_{OX} 的值对电感性能的影响,如图7(a)所示, L 值保持不变,在高频频段 Q 值随着 C_{OX} 的减小而增加,自振频率也随着 C_{OX} 的减小而增加。然后仿真了不同的 R_s 值对柔性电感性能的影响,如图7(b)所示,随着 R_s 的减小, L 值保持不变,低频段时品质因数 Q 增加,自振频率不变,这是由于串联电阻的减小使得金属的损耗降低,故低频段的 Q 值增加,但是 L 值和寄生的电容值不变导致自振频率不变。最后仿真了 C_s 参数对柔性螺旋电感性能的影响,由图7(c)可以看出随着 C_s 减小, L 值保持不变,在高频段的品质因数 Q 值有显著增加,并且自振频率也显著提高。

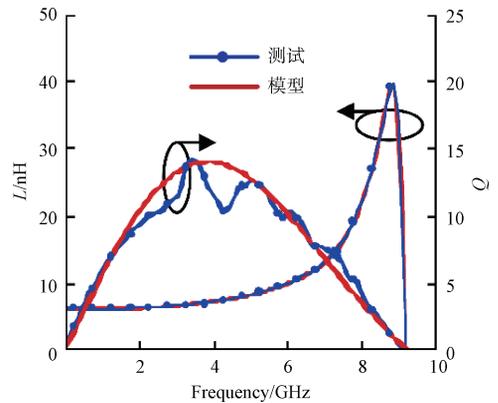
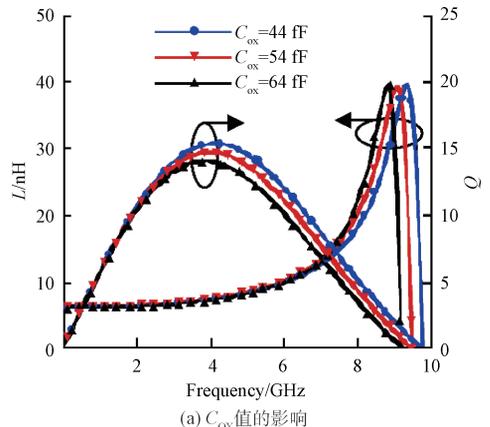


图7 柔性电感模型仿真数据与测试数据的对比

由上述仿真数据的分析可总结出,对于柔性螺旋电感,在电感值一定时,可以通过减小串联电阻的方法来增加 Q 值,具体方式为增加螺旋线圈的金属厚度和提高螺旋线圈的金属电导率。此外,通过减小寄生电容的值,可以增加 Q 值和提高自振频率,具体方式可选择增加金属间介质层的厚度、选用低介电常数的介质层、减小中心电极引线的宽度等方式实现。



(a) C_{OX} 值的影响

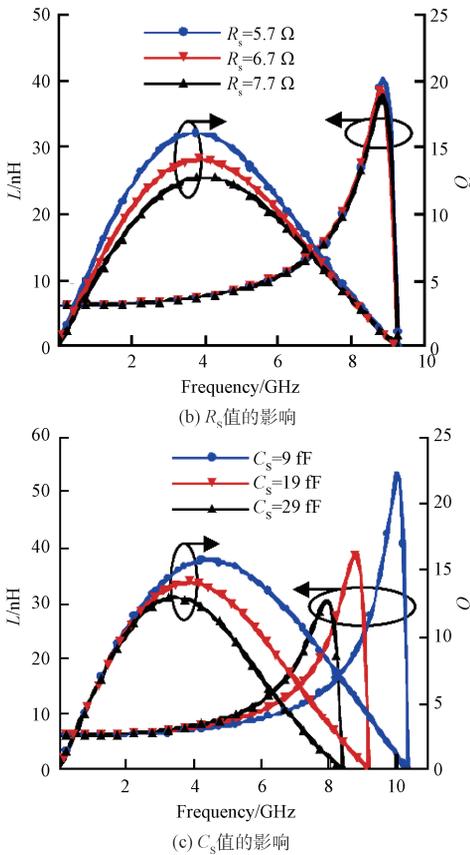


图 8 不同模型参数值对柔性螺旋电感性能的影响

5 结 论

本文介绍了柔性螺旋电感的制造工艺,并通过与传统硅基体上的平面螺旋电感性能比较,证明了柔性电感在性能上的优势,并提出了精确表征柔性螺旋电感的等效电路模型,此外通过模型参数的仿真分析提出了优化柔性螺旋电感性能的方案。这些分析和结论对柔性电感的设计具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] ROGERS J A, SOMEYA T, HUANG Y. Materials and mechanics for stretchable electronics [J]. Science, 2010, 327(5973): 1603-1607.
- [2] SHARIFI H, MAY J, SHINOHARA K, et al. First demonstration of W-band millimeter-wave flexible electronics [C]. Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International, 2013:1-4.
- [3] 黄英, 缪伟, 李雷鸣, 等. 三维力柔性触觉传感器电极研究与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1):57-63.
- [4] QIN G X, YUAN H C, CELLER G K, et al. RF model of flexible microwave switches employing single-crystal silicon nanomembranes on a plastic substrate [J]. Microelectronic Engineering, 2012, 95(7):21-25.
- [5] SUN L, QIN G X, SEO J H, et al. Flexible electronics: 12-GHz thin-film transistors on transferrable silicon nanomembranes for high-performance flexible electronics [J]. Small, 2010, 6(22): 2553-2557.
- [6] SUN L, QIN G, HUANG H, et al. Flexible high-frequency microwave inductors and capacitors integrated on a polyethylene terephthalate substrate [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(1): 013509-013509-3.
- [7] 余节约, 刘真. 基于油墨流布模型的平板印刷油墨预置[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6):1353-1358.
- [8] MENICANIN A B, ZIVANOV L D, DAMNJANOVIC M S, et al. Low-cost CPW meander inductors utilizing ink-jet printing on flexible substrate for high-frequency applications [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(2): 827-832.
- [9] 徐知, 郭海帆. 用于提高微波矢量网络分析仪测量性能的电路框架[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8):10-14.
- [10] 宋祖勋, 毋宝玉, 张朋. 一种应用于近场测试系统的小型化超宽带 Vivaldi 天线设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6):99-102.
- [11] BENAÏSSA K, YANG J Y, CRENSHAW D, et al. RF CMOS on high-resistivity substrates for system-on-chip applications [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50(3): 567-576.
- [12] WANG R L, CHEN C J, LIN Y R. Radio-frequency inductors on high-resistivity silicon substrates with a nanocrystalline silicon passivation layer [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(4):04CB03-04CB03-4.
- [13] ZHENG Y, LI H Z, LIANG J, et al. Modeling and analysis of the self-capacitance of spiral inductors for xctd profiler [J]. Ocean Technology, 2013(1): 21-23.
- [14] SIA C B, WEI M L, ONG B H, et al. Modeling and layout optimization techniques for silicon-based symmetrical spiral inductors [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 143(12):1-18.
- [15] HAN B, TIAN Z, WANG D. Analysis of scalable two- π equivalent-circuit model for on-chip spiral inductors [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2014, 25(2):93-100.

作者简介

徐艳蒙, 硕士研究生, 研究方向为柔性无源器件的设计、建模表征。

E-mail: xuyanmeng_tju@163.com.