

电极参数对氧化铝陶瓷平面螺旋电感器电性能的影响

李秀山^{1,2}, 施威², 朱建华², 陆松杰², 张岩¹

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东深圳 518055;
2. 深圳振华富电子有限公司, 广东深圳 518109)

摘要: 为了提高电感器的自谐频率, 采用半导体工艺制作了一款氧化铝陶瓷平面螺旋电感器, 应用网络分析仪单端口法测试平面螺旋电感器的 S 值, 推导出它的电感值和 Q 值。应用有限元分析法分析了平面螺旋电感器电极宽度、电极间距、电极匝数、线圈半径等电极参数对其电感值(L)和品质因数(Q)值的影响。实验结果表明, 测试结果在低频段与仿真结果具有很好的一致性, 随着频率的升高, 测试结果与仿真结果的差别增大, 可能是因为测试过程中探头的寄生效应导致。

关键词: 平面螺旋电感; 电极参数; 电性能; 仿真分析; 测试

中图分类号: TM55

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)02-0035-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.02.008

The influence of electrode parameters on the electrical properties of alumina ceramic planar spiral inductors

LI Xiu-shan^{1,2}, SHI Wei², ZHU Jian-hua², LU Song-jie², ZHANG Yan¹

1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;
2. Shenzhen Zhenhua Fu Electronics Co, Ltd, Shenzhen 518109, China

Abstract: In order to improve the self-resonant frequency (SRF) of the inductor, an alumina ceramic planar spiral inductors was manufactured by semiconductor micromachining technology. The S -value of planar spiral inductors was tested by single port network analyzer. The L and Q value of inductor were deduced. The finite element analysis method was applied to investigate the influence of width, spacing and number of the electrode and coil size on the inductance (L) and quality factor (Q) of planar spiral inductor. The L and Q value of inductor were deduced. The measured results show coincidence on the whole of the simulated results with the tested results in the low frequency band. The difference between the test and simulation results is more and more notable with increasing frequency. We explained this is caused may by the introduced parasitic effect of probe in the process of testing.

Key words: spiral inductance; electrode parameters; electric properties; simulation; test

1 引言

随着集成电路的发展, 器件小型化已成为必然的趋势。电感器作为一种常用的电子元件, 具有阻交流、通直流的特性, 它与电阻器或电容器可以组成滤波器及谐振电路等, 在集成电路中起着重要的作用^[1-4]。平面螺旋电感器易于片上集成, 具有体积小、精度高的优点, 广泛应用于功率放大器、电压控制振荡器、低噪声放大器等射频电路中, 起着阻抗匹配、滤波的作用^[5]。硅片、玻璃基底的平面螺旋电感器国内外已有大量的研究^[6], 螺旋电极的外端作为一个接触端电极, 内端连接一个底电极从螺旋电极底部穿过形成另一接触口。输入端口和输出端口

都在螺旋线圈的外部, 采用的测试方式为双探针法, 探针结构通常为 GSG 结构^[7-10]。在引线键合时, 由于螺旋电极和底部电极的间距小, 会引入较大的寄生电容, 限制了电感器的自谐频率, 因此设计了单层电极的平面螺旋电感器。

单层平面螺旋电感器具有结构简单、制作工艺方便的特点。适合于平面螺旋电感器的基底材料通常有硅、玻璃和氧化铝陶瓷, 由于氧化铝陶瓷基板与硅和玻璃基板相比具有电阻率高、涡流损耗小及与金属的粘附性好的优点, 因此选用氧化铝陶瓷基板作为平面螺旋电感器的基板具有 Q 值较高、器件可靠性高及成品率高的特点^[11-12]。

收稿日期: 2019-01-11

修回日期: 2019-05-21

作者通讯: 张岩 E-mail: 545874577@qq.com

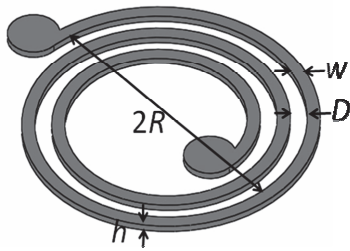


图 1 芯片电感器结构

本实验设计了氧化铝陶瓷基底平面螺旋电感器，采用有限元分析法研究电感器的电极参数变化对平面电感器电性能的影响。制作了外半径 0.55 mm、电极线宽为 30 μm、间距为 70 μm、匝数为 2.5 的电感器，采用单端口测量法得到平面螺旋电感器的 *S* 参数，推导了 *L* 值和 *Q* 值。

2 器件结构及仿真

2.1 器件结构

氧化铝陶瓷平面螺旋电感器的结构如图 1 所示，螺旋型金属电极附着于表面光滑的陶瓷基板表面，电极两端连接直径为 100 μm 的端头，用于测试过程中探针接触及引线键合，电极主要参数为电极匝数 (*N*)、电极宽度 (*W*)、电极厚度 (*h*)、电极间距 (*D*)、电极周期 (*T*), $T=W+D$, 电极外径 ($2R$), 基板横向尺寸为 1.5 mm×1.5 mm, 基板厚度 300 μm, 介电常数为 9.4, 介电损耗角正切为 0.006。

2.2 仿真分析

采用有限元分析软件 ANSYS HFSS 分析不同电极参数对电性的影响，首先仿真电极外半径对 *L* 值和 *Q* 值的影响。

固定 $W=50\ \mu\text{m}$, $h=5.5\ \mu\text{m}$, $D=50\ \mu\text{m}$, $N=2.5$, 对应不同半径 *R* 的 *Q* 和 *L* 的频率特性仿真结果如图 2 所示。可以看出，电感器半径增大，电感值增大，是因为电感器线圈面积增大使得电感值增大；*Q* 值在未达到最大值时，在低频段，半径增大，*Q* 值增大。

固定 $W=50\ \mu\text{m}$, $D=100\ \mu\text{m}$, $N=2.5$, $R=0.55\ \text{mm}$, 对应不同电极厚度 *h* 的器件 *Q* 和 *L* 的频率特性仿真结果如图 3 所示。可以看出，电感器电极厚度增大，电感值不变。*Q* 值在未达到最大值时，电极厚度越大，电感器的 *Q* 值越大，是因为厚度增大，电感器的电阻减小；当电感器 *Q* 值达到最大值后，随频率升高 *Q* 值逐渐降低，电极厚度对 *Q* 值的影响可以忽略，是因为频率增高后，趋肤深度小于电极厚度，

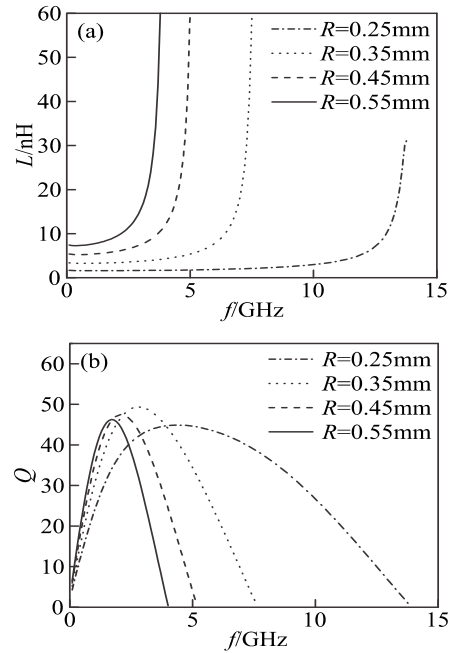


图 2 对应不同电极外径 *R* 的电感器的(a) *L* 和(b) *Q* 频率特性

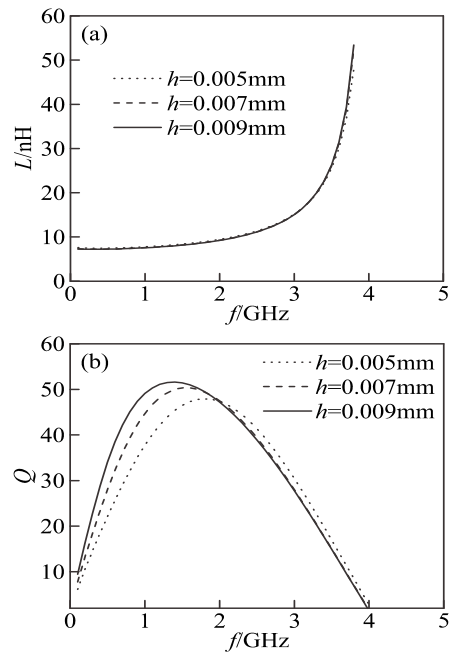
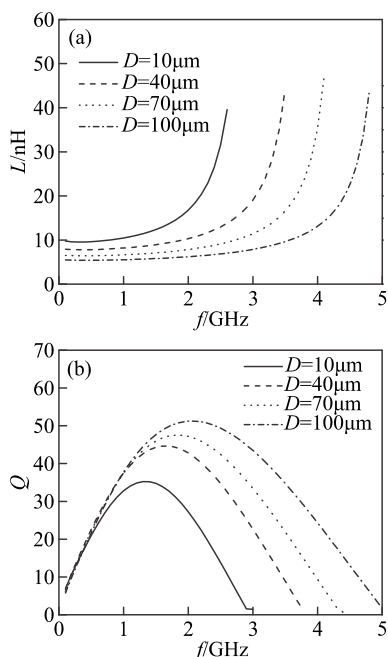
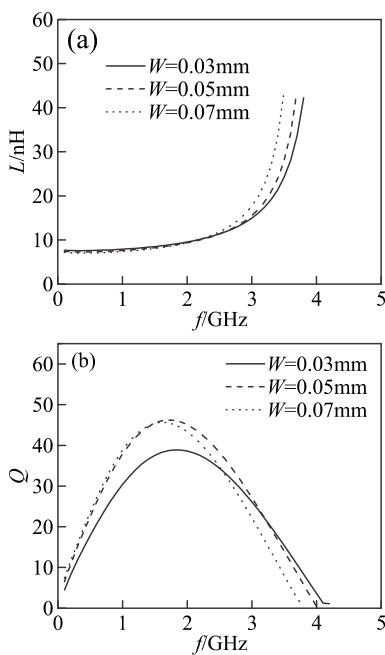
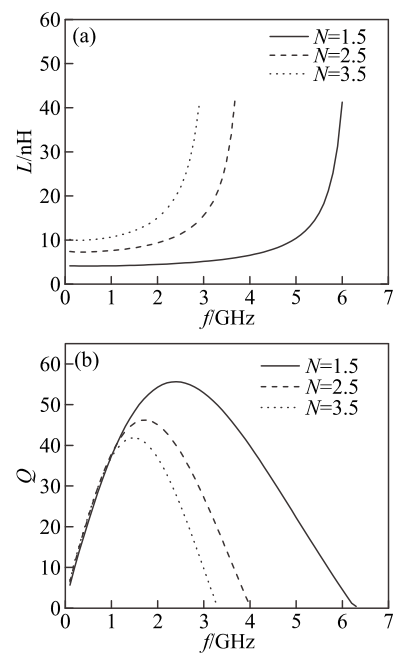


图 3 对应不同电极厚度 *h* 的电感器的(a) *L* 和(b) *Q* 的频率特性

电阻与趋肤深度有关，而不受电极厚度影响。固定 $W=50\ \mu\text{m}$, $N=2.5$, $h=5.5\ \mu\text{m}$, $R=0.55\ \text{mm}$, 对应不同电极间距 *D* 的器件 *Q* 和 *L* 的频率特性仿真结果如图 5 所示。可以看出，电感器电极间距增大，电感值降低，是因为电感器线圈中心面积减小使得电感值减小。*Q* 值随频率的升高先增大后减小。在 *Q* 值未达到最大值之前的低频率段，间距对 *Q* 值的影响可以忽略不计，在频率进一步增高后，电极间距 *D* 增大则电感器在相同频率对应的 *Q* 值增大，*Q* 峰值

图4 对应不同电极间距 D 的电感器的(a)L和(b)Q的频率特性图5 对应不同电极周期 W 的电感器的(a)L和(b)Q的频率特性图6 对应不同电极匝数 N 的电感器的(a)L和(b)Q的频率特性

点相对应的频率降低。

固定 $N=2.5$, $h=5.5 \mu\text{m}$, $T=0.1 \text{ mm}$, $D=(0.1 \text{ mm}-W)$, $R=0.55 \text{ mm}$, 对应不同电极宽度 W 的器件 Q 和 L 的频率特性仿真结果如图5所示。可以看出,电感器电极宽度变化对电感值影响不明显,是因为电感器线圈面积随电极宽度的变化可以忽略不计,电极宽度减小,电极间距增加,电极之间的电容减小,电感的自谐频率增高。电极宽度减小,电极的电阻增大,使得电极 Q 值减小。

固定 $W=50 \mu\text{m}$, $D=50 \mu\text{m}$, $h=5.5 \mu\text{m}$, $R=0.55 \text{ mm}$, 对应不同电极匝数 N 的器件 Q 和 L 的频率特性仿真结果如图6所示。结果表明,电极匝数越多,电感值越大, Q 峰值越小。是因为电极匝数增加后电极磁场耦合的结果导致电感值增大,电极的电阻增大导致 Q 峰值减小。

3 器件制备及性能测试

3.1 器件制备

将陶瓷基板经过表面清洗后,在表面蒸镀一层 200 nm 厚的金作为种子层,光刻显影,将设计的电感器电极图案的互补图案复制到金属层表面,在电镀中起遮挡作用,电镀增厚金层厚度到 $5.5 \mu\text{m}$ 形成螺旋电极图形,采用丙酮溶液清洗干净光刻胶,光刻,显影,在电极表面用光刻胶保护电镀后的金层

表面,刻蚀种子层,去掉光刻胶,平面螺旋电感器制作完成。以电感器参数 $W=0.03 \text{ mm}$ 、 $D=0.07 \text{ mm}$, $h=5.5 \mu\text{m}$ 、 $R=0.55 \text{ mm}$ 、 $N=2.5$ 制作完成的平面电感器显微照片如图7所示,白色的为氧化铝陶瓷基板,黑色的为金属电极。

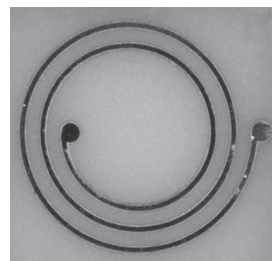


图7 平面螺旋电感器照片

3.2 器件测试

平面电感器的等效电路如图8所示^[13]。 R 是电感器内电阻, L 是电感值, C_s 是电极之间的寄生电容, C_g 是电极和地之间的电容, P_1 和 P_2 是芯片电感器的两个端口。

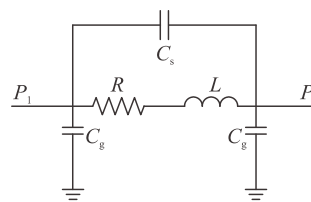


图8 平面螺旋电感器等效电路图

芯片电感器结构只有信号输入端和输出端两个端口，没有接地端口，GSG 结构射频探针不再适用于芯片电感器的测试，设计了单端头探针测试法测试芯片电感器的电感值和 Q 值。网络分析仪连接一根 $50\ \Omega$ 的阻抗线，阻抗线另一端连接具有两根探针的探头，探头的一根针连接阻抗线的信号线，另一根针连接地线。将探针通过开路 and 短路校准，去除同轴线及探头的附加阻抗，通过测试 S_{11} 参数，推导出芯片电感器的 L 值和 Q 值，实现对平面电感器的精确测试。

4 结果和讨论

电感器的阻抗(Z_L)与反射系数 S_{11} 的关系为^[14]

$$S_{11} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \quad (2)$$

Z_L 是平面电感器的复阻抗， Z_0 是基准阻抗，平面电感器的电感和电阻的测试值由阻抗值 Z_L 导出：

$$L(f) = \frac{\text{Imag}(Z_L)}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (3)$$

$$R(f) = \text{Real}(Z_L) \quad (4)$$

进而推导出

$$Q = \frac{\text{Imag}(Z_L)}{\text{Real}(Z_L)} \quad (5)$$

单端头法测试得到的 S_{11} 参数的实部和虚部如图 9 所示，计算得到的 L 值和 Q 值如图 10 所示。500 MHz 以内，实验结果和仿真结果具有很好的一致性，超过 500 MHz，由于寄生效应的影响，测试探头的信号线和地线之间不再是 $50\ \Omega$ 的阻抗值。测试探头引入的寄生效应随频率的升高而增大，导致测试得到的 S_{11} 的实部和虚部与真实值出现了较大的偏差。 S 参数换算成 L 值和 Q 值后，测试结果和仿真结果开始出现偏差，随测试频率的升高，误差增大。

5 结论

采用有限元分析法研究了电极参数对电感器电感和 Q 值的影响，并制作了一款电感器，通过单端头法测试了电感器的 S_{11} 参数，推导出电感器的电感值和 Q 值。实验结果表明，在低频阶段，测试结果和仿真结果具有很好的一致性，在高频阶段，受寄生效应的影响，测试结果和仿真结果出现差别，并

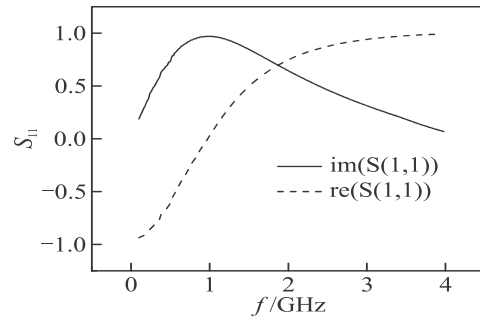


图 9 电感器样品 S_{11} 参数实部和虚部的测试结果

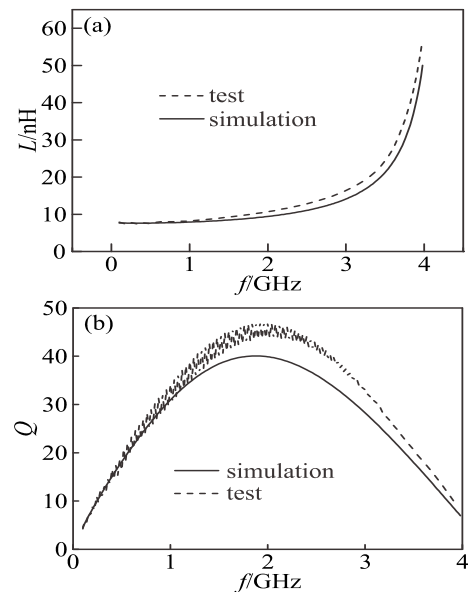


图 10 电感器样品仿真及测试结果对比：(a)电感值，(b) Q 值

且随着频率升高，差别增大。

参考文献：

- [1] Gupta M K, Mishra S, Kumar G. Novel design of spiral inductor for multi GHz range for optimized inductance and Q factor[C]//Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2016 International Conference on. IEEE, 2016: 1-4.
- [2] 张义, 施威, 张红旗, 等. 宇航用 PB 型叠层片式电感器评估试验及应用建议[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(5): 91-99.
- [3] 王洪辉, 孙文俊, 孙海燕. 基于封装基板上的平面螺旋电感建模与分析[J]. 电子世界, 2018, 554(20): 12-15.
- [4] Zhang Y X, Zhang A, Wang B R, et al. Radio-frequency modeling and parameter extraction of graphene on-chip spiral inductors [J]. Infrared Millim Waves, 2018, 37(4): 393-398.
- [5] 唐晓莉, 苏桦, 张怀武. 平面薄膜电感的研究与开发现状[J]. 磁性材料及器件, 2003, 34 (2): 37-38.