

抗过载片上集成 MEMS 悬浮螺旋电感

李建华¹, 卢冲赢¹, 徐立新¹, 武浩²

1. 北京理工大学机电动态控制重点实验室, 北京 100081
2. 淮海工业集团有限公司, 长治 046012

摘要 针对微机电系统(MEMS)悬浮电感机械性能较差问题,设计了一种应用于高过载环境的片上集成 MEMS 悬浮螺旋电感。通过采用一种新颖的阶梯式螺旋线圈结构,有效减小了悬浮线圈在高过载环境中的变形与应力。利用 ANSYS 和 HFSS 软件对设计的电动力学性能和射频性能进行联合仿真。仿真结果表明,采用阶梯式螺旋线圈的 MEMS 悬浮电感的抗过载能力比采用等截面线圈的传统 MEMS 悬浮电感提高了近 3 倍,并且具有相当的射频性能;与增加了支撑柱的等截面 MEMS 悬浮电感相比,所设计的 MEMS 悬浮电感具有与之相当的力学性能,但是其射频性能明显优于增加了支撑柱的电感。

关键词 微机电系统;悬浮螺旋电感;阶梯式螺旋线圈;过载

中图分类号 TN40

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.008

Anti-overloading on-chip integrated MEMS suspended spiral inductor

LI Jianhua¹, LU Chongying¹, XU Lixin¹, WU Hao²

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Huaihai Industries Group Co. Ltd., Changzhi 046012, China

Abstract For the presence of the suspended spiral coil, the MEMS suspended inductor has unsatisfactory mechanical performance, and use of the inductor in shock environments is restricted. Aimed at this problem, this paper designed an on-chip integrated MEMS suspended spiral inductor with a novel step-shaped spiral coil. A simple cantilever beam was used to explain the design principle, and the radio frequency performance was considered together with the mechanical performance in the design to ensure the high- Q characteristic, which is the main and inherent advantage of the MEMS suspended inductor. The fabrication process of the inductor is briefly introduced. ANSYS and HFSS were used to study the mechanical performance and the radio performance of the inductor, respectively. To compare with simulation results of the introduced inductor (denoted by 'Inductor-A'), a conventional MEMS suspended inductor with an equal cross-section area spiral coil (denoted by 'Inductor-B') and a conventional MEMS suspended inductor with an additional support pillar (denoted by 'Inductor-C') were also analyzed by using ANSYS and HFSS at the same time. The results show that the anti-overload capacity of Inductor-A was improved by about three times that of the Inductor-B, while radio frequency performances of both inductors were almost the same, and accordingly, the quality factor of Inductor-A was much higher than that of Inductor-C, while mechanical performances of both inductors were almost the same. The results indicate that the inductor presented in this paper has excellent radio frequency performance and mechanical performance.

Keywords micro electro mechanical system; suspended spiral inductor; step-shaped spiral coil

与分立电感相比,片上集成电感在成本、尺寸及功耗等方面具有明显优势,是射频集成电路与单片微波集成电路的重要无源器件^[1,2]。标准互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺

制作的片上电感由于存在严重的衬底损耗与欧姆损耗,电感的品质因数(quality factor, Q)通常不大于 10,不能满足高性能射频电路的要求。采用微机电系统(micro electro mechanical

收稿日期:2014-09-24;修回日期:2014-11-24

作者简介:李建华,博士后,研究方向为微机电技术,电子信箱:jh.li@gmail.com;徐立新(通信作者),研究员,研究方向为目标探测与控制、射频微机电技术,电子信箱:lxxu@bit.edu.cn

引用格式:李建华,卢冲赢,徐立新,等.抗过载片上集成 MEMS 悬浮螺旋电感[J].科技导报,2015,33(5):57-61.

system, MEMS)表面微加工工艺制作的片上集成悬浮螺旋电感可以显著减小电感的损耗因素,提高电感 Q 值^[3],Yoon等^[4]制作的MEMS悬浮电感的 Q 值达到了70以上,远大于CMOS片上电感的 Q 值,能够很好地满足高性能射频电路的性能要求。

冲击作用广泛存在于射频电路及MEMS器件的制作、运输、存储及部署、使用过程中,因此射频电路和MEMS器件需要具有足够的抗冲击能力以满足使用需求。虽然MEMS悬浮电感已经证明具有优异的射频性能,但是由于存在悬空结构,其机械性能较差,抗冲击能力不足,在受到冲击过载作用时线圈结构容易破坏,限制了片上悬浮螺旋电感的使用。为了改善悬浮线圈的机械性能,通常采用增加支撑柱^[5,6]或者在线圈和衬底之间增加介质层^[7]的方法,但是这两种方法都增大了线圈与衬底之间的耦合寄生效应,减小了悬浮螺旋电感的 Q 值。Cheon等^[8]设计的无支撑U形梁悬浮螺旋电感具有较好的机械性能,但是采用该方法制作的电感悬浮高度较低(仅为3 μm),线圈与衬底之间的耦合电容较大,使得电感谐振频率较低,并且与增加支撑柱类似,U形梁结构同样在线圈与衬底之间增加了短路通道,减小了电感的 Q 值。

针对悬浮电感具有优异射频性能但是机械性能较差的问题,设计了一种应用于高过载环境的片上集成MEMS悬浮螺旋电感及其CMOS兼容工艺。与采用等截面导线作为线圈的传统MEMS悬浮螺旋电感不同,本文所设计的悬浮螺旋电

感采用阶梯式结构导线作为电感线圈,减小了过载作用下悬浮线圈的变形与最大应力,同时并不会增加线圈与衬底间的耦合寄生效应。采用ANSYS与HFSS软件对所设计电感的力学性能与射频性能进行了联合仿真,与采用等截面梁的传统悬浮螺旋电感、增加了支撑柱的等截面梁悬浮螺旋电感的力学和射频性能进行了对比。

1 阶梯式悬浮电感结构与制作工艺

1.1 电感结构设计的考虑

MEMS电感的特征尺寸通常在 $10^2 \sim 10^3$ 微米量级,对于持续时间为毫秒量级的冲击过载,可以采用准静态方法进行受力分析;同时由于硅衬底的质量远大于电感线圈,且硅材料具有很高的弹性模量与屈服强度,可以将硅衬底近似等效为刚体^[9]。图1(a)为传统的等截面梁悬浮螺旋电感线圈,在高过载环境中,基于硅刚体假设,电感线圈主要受到惯性力作用,线圈的变形与应力大小及线圈结构的尺寸、形状、材料及所加约束有关。分析可知,悬浮线圈中靠近支撑柱端的导线将受到较大的力矩作用,因此取该段导线为对象进行分析,如图1(b)所示。分析采用准静态方法,略去了等效为刚体的低阻硅衬底。将该导线作为悬臂梁进行分析,悬臂梁的A端为固支端,当线圈的变形较小时,可以近似忽略导线中的轴向力,将线圈剩余部分对该段导线的作用力等效为作用在悬臂梁末端(B端)的扭矩 T_0 、弯矩 M_0 和集中力 F_0 。

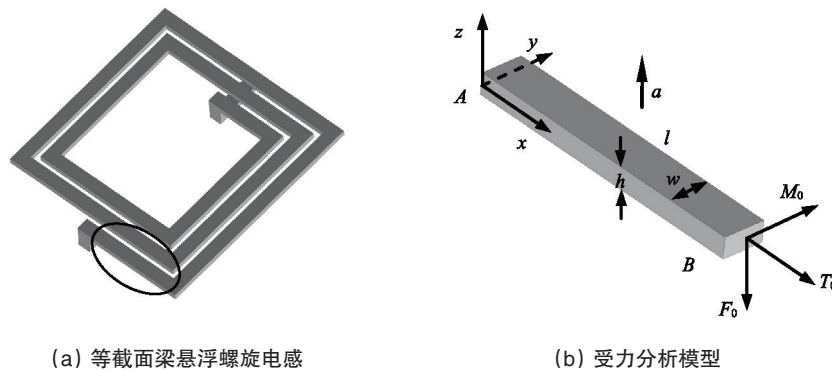


图1 悬浮螺旋线圈及受力分析模型
Fig. 1 Suspended spiral coil and analytical model of mechanical performance

悬浮线圈对线圈平面法线方向(图1(b)中 z 轴方向)的过载最为敏感,因此在 z 轴正方向加载幅值为 a 的时变加速度载荷。将悬臂梁受到的惯性力视为沿长度方向(x 方向)的分布载荷,可以得到单位长度的分布载荷 $q(t)$ 为

$$q(t) = wh\rho a \quad (1)$$

式中, w 、 h 、 ρ 分别为悬臂梁的宽度、高度和材料密度。以固支端A点作为原点,分析可知梁的危险截面为A端截面,计算得到A端截面的弯矩与扭矩后,即可根据第四强度理论计算等效应力 σ_{e4} ,计算式为

$$\begin{aligned} \sigma_{e4} &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{M_{\max}}{W}\right)^2 + 3\left(\frac{T_0}{W_p}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{-3ql^2 - 6M_0 - 6F_0l}{wh^2}\right)^2 + 3\left(\frac{T_0}{\alpha wh^2}\right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, l 为悬臂梁的长度, σ 和 τ 分别为A端截面的最大弯曲正应力与扭转切应力, M_{\max} 为A端截面最大弯矩, W 为弯曲截面系数, W_p 为扭转截面系数, α 为与梁横截面尺寸有关的因数。可知,在相同的过载环境下,梁中的应力越小,意味着其

强度越大,抗过载能力越强。由式(2)可知,通过增大宽度 w 、厚度 h 或是减小 B 端作用力 M_0 、 F_0 与 T_0 ,可以得到较小的应力值,下面分别对3种减小应力的措施分别进行讨论。

增大绕线宽度 w :在上述的减小应力的措施中,由于增大宽度 w 会显著增大电感与衬底之间的耦合电容,减小电感的谐振频率,因此并不是最优的选择。

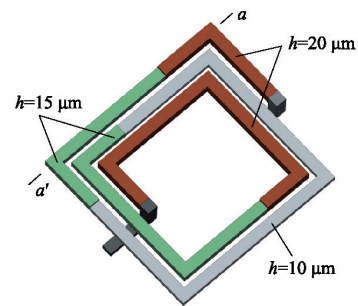
减小 M_0 、 F_0 和 T_0 : B 端作用力 M_0 、 F_0 和 T_0 由线圈剩余导线的结构和尺寸决定,由于线圈受到惯性力作用,因此通过减小剩余线圈的线圈截面积的方法可以达到减小 M_0 、 F_0 和 T_0 的目的,例如减小线圈剩余导线的高度可以显著减小 M_0 、 F_0 和 T_0 ,但是必须要保证导线具有足够的刚度。

增大导线厚度 h :由式(2)可知,相较于增大导线宽度,增大导线厚度对减小应力的作用更为明显,由于相邻线圈之间的电位差非常小,因此可以忽略由于导线厚度增大导致的电容效应,增大导线厚度还可以减小导线中的交流电阻。但是过高的导线厚度又会导致两个方面的负面效应。首先,随着导线厚度的增大相邻线圈之间的邻近效应会逐渐增大,导致涡流损耗增大^[10];其次是导线厚度增大后工艺难度和工艺成本会显著增大。研究表明,当导线高度达到趋肤效应的3~5倍时即可以很好地达到减小绕线交流电阻的效果^[11,12],当频率为1 GHz时,铜导线中的趋肤深度为2.1 μm ,可知最优化的铜导线高度为7~10 μm ,并且随着频率的增加,最优化的铜导线高度减小,应用于 L 波段以上频率的悬浮螺旋电感的绕线高度大多不超过10 μm ^[1-4]。

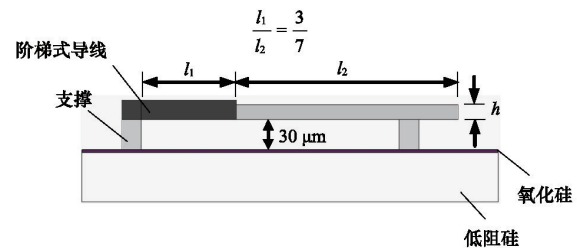
综合上述3个方面的分析可知,增大导线厚度,同时减小线圈剩余部分对导线的作用力是减小导线中最大应力的有效途径。导线厚度的选择需要综合考虑机械性能和射频性能的要求。对于线圈剩余部分,即对于远离支撑柱端的导线,减小其截面积可以减小其作用在 B 端的作用力,但是同样需要考虑结构刚度和线圈的射频性能。

1.2 电感结构参数与制作工艺

图2为经过优化设计得到的采用阶梯式螺旋线圈的悬浮螺旋电感。电感线圈材料为铜,图2中未给出氧化硅绝缘层与低阻硅衬底,为了区别不同厚度的线圈部分,采用了3种颜色来表示线圈。图2(b)为沿图2(a)中 $a-a'$ 截面得到的阶梯梁导线侧视图,图中增加了线圈内圈引出支撑柱与外圈引出支撑柱。悬浮电感线圈导线下表面距离氧化硅绝缘层上表面(即悬浮高度)设计为30 μm 以减小衬底损耗。为了改善线圈的抗过载性能,同时考虑到导线中的涡流效应和工艺可行性,靠近支撑柱的线圈导线高度设计为20 μm ,远离支撑柱的线圈导线高度设计为10 μm ,为了提供足够的结构弯扭刚度,中间过渡段线圈导线高度设计为15 μm 。电感线圈内径200 μm ,绕线宽度为20 μm ,绕线间距10 μm ,根据Greenhouse方法^[13]计算得到2.5圈电感的电感值为2.7 nH。对于每一段阶梯式导线,其较厚的部分的长度和较薄的部分的长度之比 l_1/l_2 均为3/7。



(a) 阶梯式螺旋电感和引线示意



(b) 电感侧视图

图2 采用了阶梯式螺旋线圈的悬浮电感结构示意图

Fig. 2 Suspended inductor with step-shaped spiral coil and side view of the inductor

图3为所设计的阶梯式线圈MEMS悬浮电感正胶牺牲层表面加工工艺,该工艺已经用于制作等截面MEMS悬浮电感并取得了很好的制作效果^[14]。

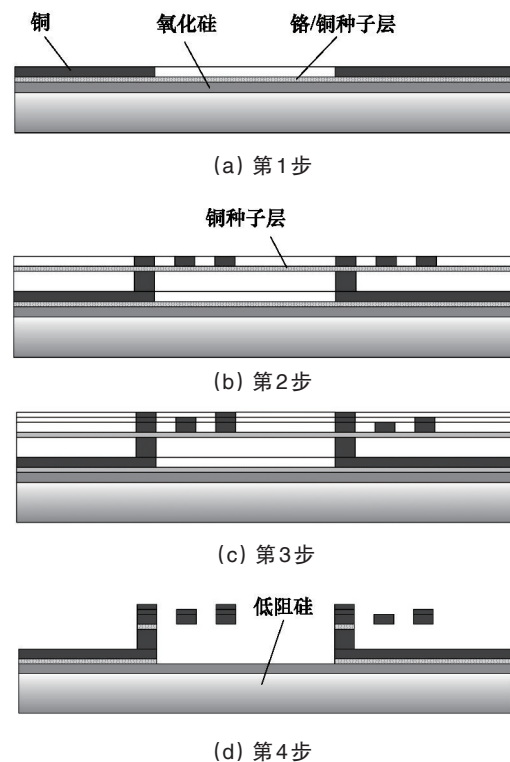


图3 阶梯式悬浮电感制作工艺

Fig. 3 Fabrication process of step-shaped MEMS suspended inductor

具体工艺过程:1) 清洗带有氧化层的低阻硅基片,在氧化硅绝缘层上磁控溅射一层铬/铜种子层,涂覆 $10\ \mu\text{m}$ 正胶,曝光显影后形成电感引线的电镀区域,电镀电感引线;2) 涂覆 $20\ \mu\text{m}$ 正胶,曝光显影后电镀形成电感悬浮线圈支撑柱,磁控溅射铜作为线圈电镀种子层,涂覆 $10\ \mu\text{m}$ 正胶,曝光显影后电镀铜形成悬浮线圈结构;3) 涂覆 $5\ \mu\text{m}$ 正胶,曝光显影后电镀铜形成导线高度为 $15\ \mu\text{m}$ 的阶梯式导线,重复一次该工艺步骤,即可得到最终的阶梯式线圈;4) 去除所有的种子层和光刻胶,得到所设计的悬浮螺旋电感。该工艺简单易行,最高工艺温度不超过 120°C ,不会影响已经完成铝金属化的 CMOS 电路的性能,因此具有与 CMOS 工艺相兼容的特点。

2 阶梯式悬浮电感的力学与射频性能

采用 ANSYS 有限元分析软件对图 2 所示的阶梯式悬浮电感进行仿真,同时建立了采用等截面梁的传统悬浮螺旋电感(以下简称传统悬浮电感)、增加支撑柱的等截面梁悬浮电感(以下简称带支撑柱电感)模型作为对照。图 4 分别为阶梯梁式悬浮电感、传统悬浮电感与带支撑柱电感的仿真模型,传统悬浮电感与带支撑柱电感线圈导线的高度均为 $10\ \mu\text{m}$,其他的结构尺寸参数如绕线宽度、绕线间距、悬浮高度、线圈内径等参数均与阶梯式悬浮电感相同。电感线圈材料均为铜,杨氏模量 $125\ \text{GPa}$ 、密度 $8900\ \text{kg/m}^3$ 、泊松比 $0.32^{[15]}$,由于铜薄膜的屈服强度要大于体材料的屈服强度,并且考虑到铜薄膜力学性能分布特性,采用结构最大应力超过体材料的屈服强度($100\ \text{MPa}^{[16]}$)作为结构屈服判定标准。

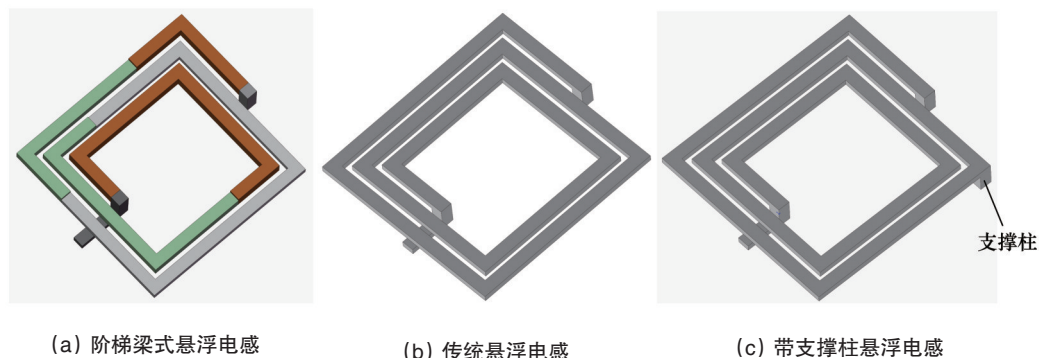


图 4 电感仿真模型

Fig. 4 Simulation models of the inductor

仿真中所加载荷为持续时间 $5\ \text{ms}$ 、峰值 $200\sim 10000\ \text{g}$ 的半正弦波加速度波形,载荷方向为线圈平面外法线方向(图 1(b)中 z 方向),考虑到结构响应与频率有关,采用了瞬态动力学仿真。图 5 为仿真得到的电感线圈最大 Mises 等效应力 σ_{max} 与最大变形 d_{max} 曲线,图中曲线名称“Inductor-A”、“Inductor-B”和“Inductor-C”分别代表阶梯梁式悬浮电感、传统悬浮电感和带支撑柱悬浮电感,由于有限元计算的是弹性范围响应,因此应力与变形均呈现线性变化的规律。由图 5 可知,传统悬浮电感线圈在过载作用下的最大位移 d_{max} 与最大 Mises 等效应力 σ_{max} 均远大于阶梯式悬浮电感与带支撑柱悬浮电感,当过载峰值达到 $4800\ \text{g}$ 时最大应力即超过铜的屈服强度;阶梯式悬浮电感在过载环境中的最大变形略大于带支撑柱悬浮电感的最大变形,但是最大应力则要优于带支撑柱悬浮电感,在 $10000\ \text{g}$ 过载下阶梯式悬浮电感的 d_{max} 与 σ_{max} 分别为 $9.744\ \mu\text{m}$ 和 $78.3\ \text{MPa}$ 。可知,所设计的阶梯式悬浮电感在相同过载条件下的 d_{max} 与 σ_{max} 仅为传统悬浮电感的 40% 和 36%,说明阶梯式螺旋线圈可以有效减小悬浮螺旋电感在过载环境中的变形与最大应力,很好地提高了悬浮螺旋电感的抗过载能力。

图 6 为 HFSS 仿真得到的图 4 中所示的 3 种电感的 Q 值与

电感值 L 随频率变化曲线,图 6 曲线名称的意义与图 5 相同,低阻硅衬底电阻率为 $10\ \Omega\cdot\text{cm}$,厚度 $500\ \mu\text{m}$,氧化硅绝缘层厚度为 $1\ \mu\text{m}$,所得到的 Q 值与 L 值均进行了去嵌入处理,以消除加载激励端口的影响。由图 6 可知,阶梯式悬浮电感的 Q 值在 $1.0\sim 7.5\ \text{GHz}$ 频段内均大于 22, Q 值峰值为 28.5,峰值频率 $3\ \text{GHz}$,与传统悬浮电感的 Q 值相比差异很小,说明阶梯式悬浮电感并不会显著减小 MEMS 悬浮电感的 Q 值。而带支撑柱悬浮电感的 Q 值在整个仿真频段内均小于阶梯式悬浮电感,原因在于为了提高力学性能所增加支撑柱相当于在线圈与衬底之间增加了额外的短路通道,使得线圈与衬底之间的耦合作用增强,增大了电感的损耗。由图 6 中的局部放大 L 值曲线图可知,阶梯式悬浮电感的谐振频率要略小于传统悬浮电感的谐振频率,原因是阶梯式悬浮电感的部分线圈导线厚度要比传统悬浮电感的导线厚度要大,这使得阶梯式线圈与衬底之间的电容效应也略有增大,从而减小了悬浮电感的谐振频率,但是这种影响很小。3 种电感的 L 值在 $1\ \text{GHz}$ 时均约为 $2.7\ \text{nH}$,这与采用 Greenhouse 方法计算得到的结果相同。综合上述仿真结果可知,所设计的阶梯式悬浮线圈并不会显著影响 MEMS 悬浮电感所具有的优异射频性能。

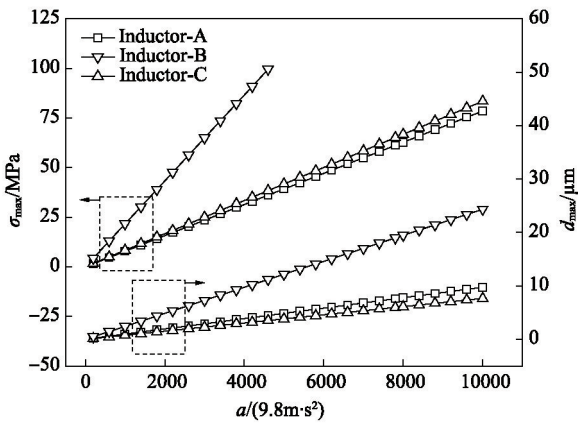


图5 电感在不同过载下的最大Mises等效应力 σ_{max} 与最大位移 d_{max}

Fig. 5 Values of σ_{max} and d_{max} of three inductor models versus amplitude of overload

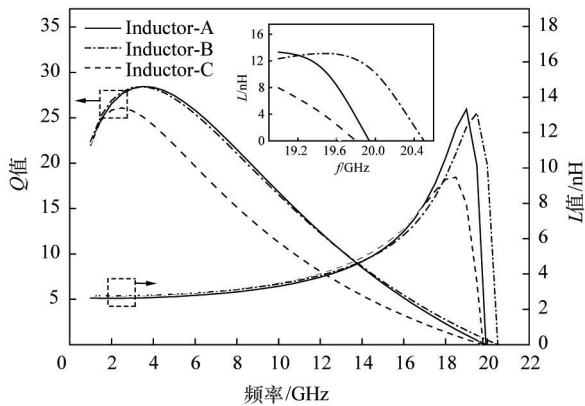


图6 电感在不同过载下电感的Q值与L值

Fig. 6 Values of Q and L of three inductor models versus amplitude of overload

3 结论

针对悬浮螺旋电感具有优异射频性能但是机械性能较差的问题,设计了一种应用于高过载环境的采用了阶梯式悬浮线圈的片上悬浮螺旋电感及其与CMOS兼容的制作工艺。对悬浮螺旋电感的线圈在过载环境下的受力进行了理论分析,讨论了线圈结构参数对线圈力学性能与射频性能的影响。ANSYS与HFSS联合仿真结果表明,所设计的阶梯式悬浮电感的抗过载能力与传统的MEMS悬浮螺旋电感相比提高了近3倍,同时具有与传统MEMS悬浮螺旋电感相同的优异的射频性能,从而较好地解决了传统MEMS悬浮螺旋电感机械性能较差的问题。

参考文献 (References)

[1] Zeng J, Wang C H, Sangster A J. Theoretical and experimental studies of

flip-chip assembled high- Q suspended MEMS inductors[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(6): 1171-1181.

[2] Tai C M, Liao C N. Multilevel suspended thin-film inductors on silicon wafers[J]. IEEE Transactions on Electron devices, 2007, 54(6): 1510-1514.

[3] 赵小林, 王西宁, 周勇, 等. 双层悬空结构射频微电感制作研究[J]. 微纳电子技术, 2005(1): 30-32.
Zhao Xiaolin, Wang Xining, Zhou Yong, et al. Fabrication and performance of double layer suspended spiral inductor[J]. Micronanoelectronic Technology, 2005(1): 30-32.

[4] Yoon J B, Choi Y S, Kim B I, et al. CMOS-compatible surface-micromachined suspended-spiral inductors for multi-GHz silicon RF ICs [J]. IEEE Electron Devices Letters, 2002, 23(10): 591-593.

[5] Yoon J B, Han C H, Yoon E, et al. Monolithic high- Q overhang inductors fabricated on silicon and glass substrates[C]//Proceedings of IEEE International Devices Meeting. Washington DC: IEEE, 1999: 753-756.

[6] 王西宁, 赵小林, 周勇, 等. 新型悬空结构射频微电感的制作与测试[J]. 电子元件与材料, 2004, 23(1): 54-56.
Wang Xining, Zhao Xiaolin, Zhou Yong, et al. A new suspended RF micro-inductor: Fabrication and measurement[J]. Electronic Components & Materials, 2004, 23(1): 54-56.

[7] Huo X, Chen K J, Chan P C H. Silicon-based high- Q inductors incorporation electroplated copper and low- K BCB dielectric[J]. IEEE Electron Device Letters, 2002, 23(9): 520-522.

[8] Cheon S, Yoon M, Park H, et al. Robust and postless air-suspended high Q integrated inductors on silicon[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 4131-4134.

[9] Srikar V T, Senturia S D. The reliability of microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(3): 206-214.

[10] 丁勇, 刘泽文, 刘理天, 等. 硅微机械悬浮结构电感的设计与制作工艺研究[J]. 电子学报, 2002, 30(11): 1598-1600.
Ding Yong, Liu Zewen, Liu Litian, et al. Design and fabrication of silicon micromachining suspended inductor[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(11): 1598-1600.

[11] Yue C P, Wong S S. Physical modeling of spiral inductors on silicon[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2000, 47(3): 560-568.

[12] Park J Y, Allen M G. Packaging-compatible high Q microinductors and microfilters for wireless applications[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 1999, 22(2): 207-213.

[13] Greenhouse H M. Design of planar rectangular microelectronic inductors [J]. IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, 1974, 10(2): 101-109.

[14] 卢冲赢, 徐立新, 李建华, 等. CMOS兼容高 Q 值微机电系统悬浮偏上螺旋电感[J]. 兵工学报, 2014, 35(5): 634-639.
Lu Chongying, Xu Lixin, Li Jianhua, et al. CMOS-compatible high- Q micro-electro-mechanical system suspended on-chip spiral inductor [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(5): 634-639.

[15] Lin J W, Chen C C, Cheng Y T. A robust high- Q micromachined RF inductor for RFIC applications[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(7): 1489-1496.

[16] Dolbow J, Gosz M. Effect of out-of-plane properties of a polyimide film on the stress fields in microelectronic structures[J]. Mechanics of Materials, 1996(23): 311-321.

(责任编辑 赵业玲)