

DC-DC转换器微型片上螺旋电感器的设计和建模

阿尔及利亚 USTO-MB 大学电气工程系 Abdelhadi NAMOUNE、Abdelkader BELBOULA,

阿尔及利亚 Hassiba Benbouali 大学电气工程系 Rachid TALEB、Fayçal CHABNI

能源与可再生能源实验室 (LGEER)

摘要: 本文研究了片上电感工艺参数的影响, 利用MATLAB仿真仿真了片上电感的特性。所有的电感均采用标准的具有金属层的硅工艺进行制造。只有当技术参数(例如顶部金属和衬底之间的金属导电率、金属厚度、氧化物厚度, 以及电感上衬底的导电率, 品质因数和自谐振频率)一起使用时, 仿真结果才是准确的。

关键词: 集成电感器, 技术参数, 螺旋电感器

1 介绍

有人可能需要协助满足设计人员对小尺寸和低成本的需求, 这是在硅射频集成电路中使用片上电感器件的可能性。片上电感在阻抗匹配、调谐和滤波中扮演重要角色。硅片面积消耗量是限制其使用的其中一个原因。整体晶片尺寸是生产成本的直接驱动因素。然而, 工艺技术的不断进步, 例如提供更厚和更高导电率的金属, 更厚和更低的介电常数介电层, 以及更低导电率的衬底, 将使得高质量片上无源器件更容易获得。已经有了许多片式电感器的设计和分析技术研究, 以将性能与工艺参数相关联。

2 方形电感器的设计和建模

螺旋电感的横向参数如图 1 所示。主要参数为匝数 (n), 金属宽度 (w), 相邻匝间距 (s), 内径 (d_{in}) 和外径 (d_{out}), 平均直径 (d_{avg})。填充率 (ρ) 由下方表达式给出:

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} = \frac{n(w+s) - s}{d_{avg}}$$

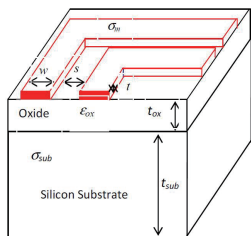


图 1 螺旋平面电感的横截面

这里:

t_{ox} 为氧化层厚度 (衬底和线圈之间的距离)

t 为金属厚度

σ_m 为金属导电率

σ_{si} 为衬底导电率

ρ_{si} 为衬底电阻率

ϵ_{ox} 衬底和线圈之间电介质的介电常数

t_{sub} 为衬底厚度

ϵ_{si} 为衬底的介电常数

微型电感器的模型如图 2 所示。螺旋 π 模型包括串联电感 (L_s), 串联电阻 (R_s), 前馈电容 (C_s), 电感与衬底电容 (C_{ox}) 以及衬底电阻 (R_{si}) 和电容 (C_{si})。

螺旋电感的电感值 (L_s) 计算由近似表达式确定。该表述式包括采用电流片近似值的电磁原理, 从分立电感器获得的。串联电感的等式为:

$$L_s = \frac{2\mu_0 n^2 d_{avg}}{\pi} \left[\ln\left(\frac{2.067}{\rho}\right) + 0.178 \cdot \rho + 0.125 \cdot \rho^2 \right]$$

其中, μ 是自由空间的磁导率 ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)。

串联电阻通过以下公式计算:

$$R_s = \frac{l}{\sigma \cdot \delta \cdot w \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right)}$$

其中, l 和 w 是螺旋电感的长度和宽度, σ 是金属导电率, t 是金属厚度, δ 是皮肤长度:

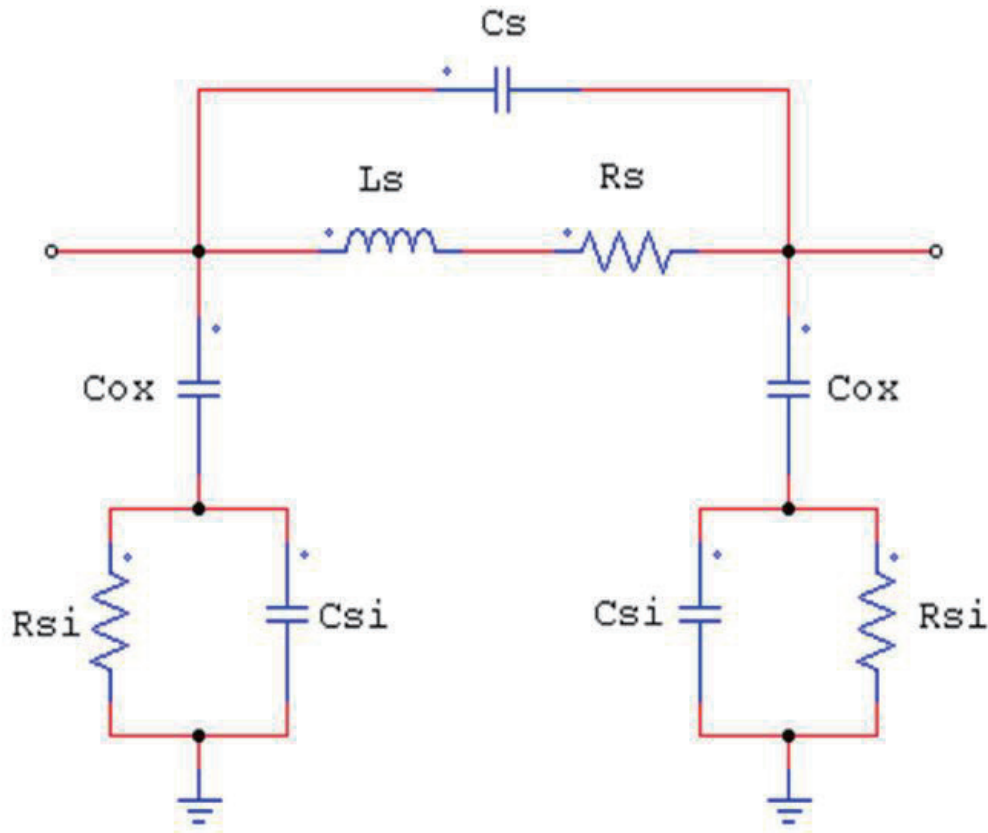


图2 等效电气模型

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \sigma}}$$

其中，f 是频率。

串联电阻表达式模拟了由于趋肤效应引起的在较高频率下电阻的增加情况。

串联电容 \$C_s\$ 表示电感输入和输出之间的寄生电容耦合情况，可以用下面的公式估算：

$$C_s = \frac{t \cdot \epsilon_0 \cdot l^2}{s}$$

其中，\$\epsilon_0\$ 是自由空间的介电常数。

\$C_{si}\$ 和 \$R_{si}\$ 分别是硅衬底的电容和电阻，\$C_{ox}\$ 是螺旋和硅衬底之间的氧化物电容，计算公式为：

$$C_{ox} = \frac{1}{2} l \cdot w \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$R_{si} = \frac{2}{l \cdot w \cdot G_{sub}}$$

$$C_{si} = \frac{1}{2} l \cdot w \cdot C_{sub}$$

其中，\$G_{sub}\$ 和 \$C_{sub}\$ 是硅衬底的每单位面积的导电率和电容，\$t_{ox}\$ 是分隔螺旋和衬底的氧化层的厚度。

集成微线圈的效率根据下面的公式进行计算：

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{Stocked energy}}{\text{dissipated energie}}$$

3 结果与讨论

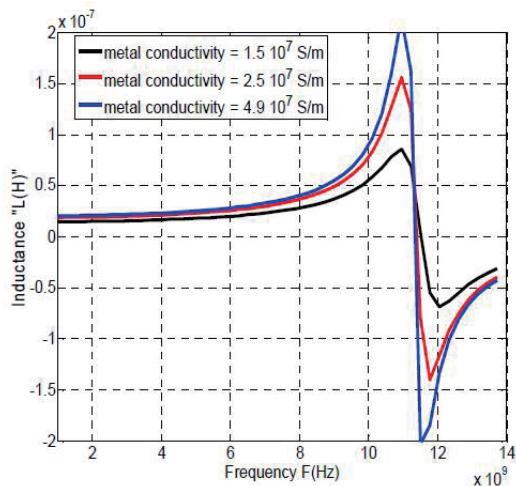
用于分析电感器的仿真步骤是器件的网格划分 (meshing) 和移植 (porting)。移植之后获得 S 参数以

计算电感值和品质因数。现在从 S 参数可获得 Y 参数。使用 Y 参数时，电感和品质因数值分别用以下两个公式进行表示。

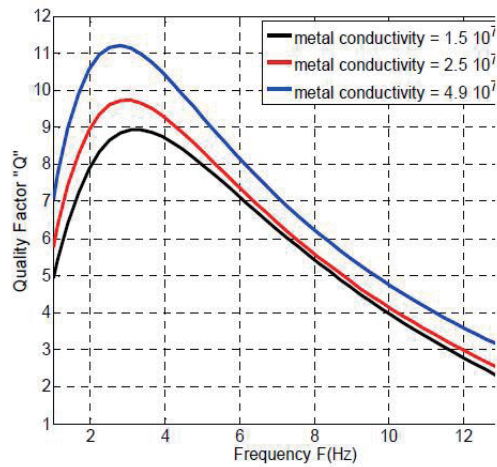
$$L = \frac{\text{Im}g\left(\frac{1}{Y_{11}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$Q = \frac{\text{Im}g\left(\frac{1}{Y_{11}}\right)}{\text{Real}\left(\frac{1}{Y_{11}}\right)}$$

通过 MATLAB 仿真研究了不同技术参数对电感值和品质因数的影响。

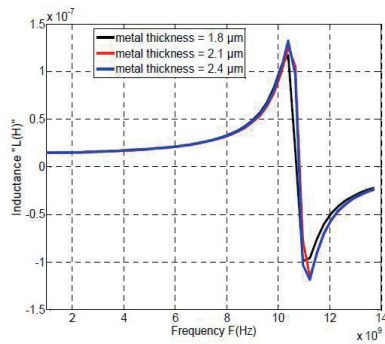


(a)

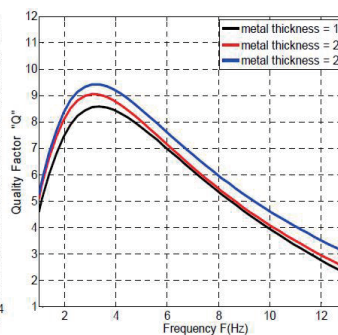


(b)

图 3 金属导电率的影响：对电感 (a)，对品质因数 (b)



(a)



(b)

图 4 金属厚度对电感的影响 (a)，对品质因数的影响 (b)

3.1 主电路

图 3.a 显示了金属导电率如何影响电感值。改变金属导电率几乎不能改变电感值。图 3.b 显示金属导电率如何影响品质因数值。可以看出，增加金属导电率可以提高品质因数值。自谐振频率不会因金属导电率而改变。因为具有较低的串联电阻，因此具有较高金属导电率的电感器具有较高的 Q 值。

3.2 金属厚度

图 4.a 说明了金属厚度如何影响电感值。改变金属厚度几乎不能改变电感值。图 4.b 显示了金属厚度如何影响品质因数值。电感的最大品质因数可以通过增加金属厚度来增强。而自谐振频率不会因金属厚度而改变。具有较高金属厚度的电感具有较高的品质因数，因为它具有较低的

串联电阻。

3.3 氧化厚度

图 5.a 显示了氧化层厚度如何影响电感值。改变氧化层厚度几乎不能改变电感值。图 5.b 说明了氧化物厚度如何影响品质因数。较宽的氧化层会减小硅衬底的电容，从而提高自谐振频率。贴装氧化物厚度将提高品质因数和自谐振频率。

3.4 衬底导电率

图 6.a 说明了衬底导电性如何影响电感值。改变衬底导电率几乎不能改变电感值。图 6.b 说明了衬底导电性如

何影响品质因数。随着衬底导电率的降低，品质因数会增加。很显然，衬底导电率是某一频段品质因数的关键限制因素。

4 结论

本文中的方形螺旋电感器是为射频电路而设计的。本文介绍了这种设计的参数特性，在设计过程以品质因数和电感值来概述其性能。利用三个值的优化参数可以获得更好的设计性能。在 4GHz 时，分析获得的品质因数的最大值为 2，自谐振频率为 11GHz。

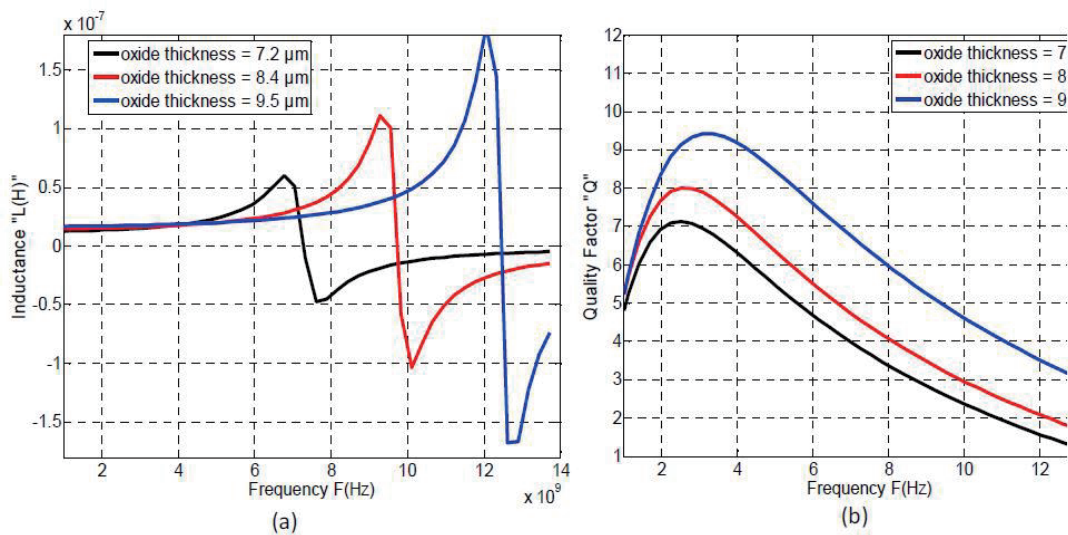


图 5 氧化层厚度对电感的影响 (a)，对品质因数的影响 (b)

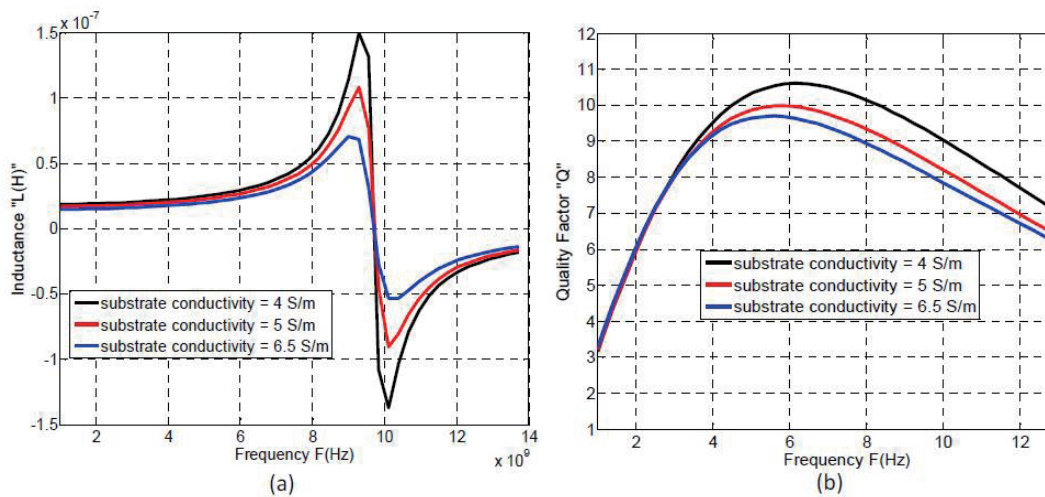


图 6 衬底导电率对电感的影响 (a)，对品质因数的影响 (b)

参考文献

- [1] Y. Fukuda, T. Inoue, T. Mizoguchi, S. Yatabe, and Y. Tachi, "Planar inductor with ferrite layers for DC-DC converter," *IEEE Trans. Magn.* 39(4), 2057-2061 (2003).
- [2] Sia, C. B., W. M. Lim, B. H. Ong, A. F. Tong, and K. S. Yeo. Modeling and layout optimization techniques for silicon-based symmetrical spiral inductors. *Progress In Electromagnetic Research*.143: 1-18, (2013).
- [3] Wang, C. and N.-Y. Kim. Analytical optimization of high-performance and high-yield spiral inductor in integrated passive device technology. *Elsevier Microelectronics Journal*. 43: 176-181. (2012).
- [3] Wang, C. and N.-Y. Kim. Analytical optimization of high-performance and high-yield spiral inductor in integrated passive device technology. *Elsevier Microelectronics Journal*. 43: 176-181. (2012).
- [4] Sandrolini, L., U. Reggiani, and G. Puccetti. Analytical calculation of the inductance of planar ZIG-ZAG spiral inductors. *Progress In Electromagnetic Research*. 142: 207-220. (2013).
- [5] Parsa Pirououznia and Bahram Azizollah Ganji. Analytical Optimization of High Performance and High Quality Factor MEMS Spiral Inductor. *Progress In Electromagnetic Research M*. 34: 17-179. (2014).
- [6] Dai, C.-L., J.-Y. Hong, and M.-C. Liu. High Q factor CMOS-MEMS inductor. *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*: 138-141. (2008).
- [6] A. Pagnetti, A. Xemard, F. Paladian, C. A. Nucci, Evaluation of the impact of proximity effect in the calculation of the internal impedance of cylindrical conductors, in: *General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI, 2011*, pp. 1-4.
- [7] A. Danisi, A. Masi, R. Losito, Y. Perriard, Modeling of high-frequency electromagnetic effects on an ironless inductive position sensor, *IEEE Sensors Journal* 13 (2013) 4663-4670.
- [8] P. Carazzetti, M. A. Dubois, N. F. de Rooij, High-performance micromachined rf planar inductors, in: *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05.*, volume 1, 2005, pp. 1084-1087 Vol. 1.
- [7] Tseng, S.-H., Y.-J. Hung, Y.-Z. Juang, and M. S.-C. Lu. A 5.8-GHz VCO with CMOS-compatible MEMS inductors. *Elsevier Sensors and Actuators A*.139: 187-193. (2007).
- [8] Zhao, P. and H. G. Wang. Resistance and inductance extraction using surface integral equation with the acceleration of multilevel green function interpolation method. *Progress In Electromagnetic Research*. 83:43-54. (2008).
- [9] Pan, S. J., L. W. Li, and W. Y. Yin. Performance trends of on-chip spiral inductors for RFICs. *Progress In Electromagnetics Research*. 45: 123-151. (2004).
- [9] A. Massarini, M. K. Kazimierczuk, Self-capacitance of inductors, *IEEE Transactions on Power Electronics* 12 (1997) 671-676.
- [10] Fengyi Huang, Jingxue Lu, Nan Jiang, Xiaowen Zhang, Wengang Wu, and Yangyuan Wang, Frequency-Independent Asymmetric Double- π Equivalent Circuit for On-Chip Spiral Inductors: Physics-Based Modeling and Parameter Extraction, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, n. 10, (2006).
- [10] J. W. Hofsajer, M. O. Crosato, Modelling of the absolute capacitance of a planar inductor for emi mitigation purposes, in: *AFRICON, 2004*.
- [11] Ivan C. H. Lai and Minoru Fujishima, A New On-Chip Substrate-Coupled Inductor Model Implemented With Scalable Expressions, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, n. 11, (2006).
- [12] Myounggon Kang, Joonho Gil and Hyungcheol Shin, A Simple Parameter Extraction Method of Spiral On-Chip Inductors, *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 52, n. 9, (2005).

上接147页