

基于 SOI 衬底的射频电感优化设计*

赵冬燕 张国艳 黄如

(北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘要: 比较 SOI RF 电感与体硅电感的性能, 并根据模拟结果分析了电感中空面积、电感形状结构、金属宽度、间距对 SOI 电感品质因数 Q 、自谐振频率、电感量 L 的影响, 最后提出了一种基于 SOI 衬底 RF 电感的优化设计原则。以往射频集成电感性能的比较并不固定电感值, 而文中全部参数的变化都是在电感值相同的情况下进行比较。

关键词: SOI 衬底; 电感量; 品质因数; 自谐振频率

EEACC: 1280; 2560

中图分类号: TN4 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2004)06-0702-05

1 引言

随着科学技术的进步和社会信息化程度的提高, 计算机无线网络、移动通讯、无绳电话、非接触 IC 卡等越来越多的领域开始使用射频技术。高工作频率、低噪声、低功耗、低电源电压、低失真、低成本这些无线通信设备的设计要求使电感的使用成为必要。体硅工艺是集成电路的主流工艺, 但是, 由于体硅工艺衬底电阻率低, 寄生大, 使得电感品质因数 Q 值难于提高, 阻碍了 RF 电感的片上集成。不同于体硅工艺, SOI 工艺中可采用高阻衬底, 寄生小, 功耗低。因此, 基于 SOI 衬底的电感与相应的体硅电感相比, 具有更高的品质因数和自谐振频率^[1]。但是目前对基于 SOI 衬底的 RF 电感的研究仍比较少, 所以, 对基于 SOI 衬底的 RF 电感的设计优化十分有意义。

本文利用 ASITIC^[2] 软件主要模拟分析了基于 SOI 衬底的 RF 电感各种设计参数对电感品质因数 Q 、自谐振频率、电感量 L 的影响。在以往的各种模拟中, 改变参数研究其对电感性能的影响的时候, 并不固定电感值。这种比较方法最大的缺陷是对品质因数 Q 及自谐振频率的比较都是以不同电感量为

基础的。本文所有参数比较是在电感量相同的前提条件下进行的。最后本文根据模拟结果提出了一种优化设计的方案。

2 基于 SOI 衬底 RF 电感的优势

平面螺旋集成电感一般结构如图 1 所示, 串联结构电感如图 2 所示, SOI 衬底结构如图 3 所示, 评价电感性能的两个基本参数是品质因数(Q 值)和自谐振频率。品质因数用来表征电感损耗, 自谐振频率表征电感的最高工作频率。在深亚微米体硅工艺中, 一般都采用重掺杂的衬底。在这样高掺杂的衬底中, 电感线圈中的电流会在其中形成镜像电流, 导致额外的电阻能量损失, 使电感值减小, 这对电感设计是一个重要的缺点。SOI 结构采用的低掺杂衬底结构抑制了镜像电流, 从而减小了电感的能量损失, 提高了电感的品质因数。

图 4(a) 比较 SOI 与体硅平面螺旋电感的品质因数 Q 及自谐振频率。由图可见, SOI 电感不仅 Q 值远远高于体硅电感, 其自谐振频率的提高也十分明显。 $6nH$ 的体硅电感自谐振频率只有 $3.3GHz$, 采用相同金属宽度、厚度和金属间距的 SOI 电感具有相同的 $6nH$ 电感值, 但其自谐振频率却高达

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA1IE1590)及国家自然科学基金(批准号: 60306005)资助项目

赵冬燕 女, 硕士研究生, 从事射频无源器件研究。

张国艳 女, 博士后, 从事射频器件电路研究。

2003-06-10 收到, 2003-08-14 定稿

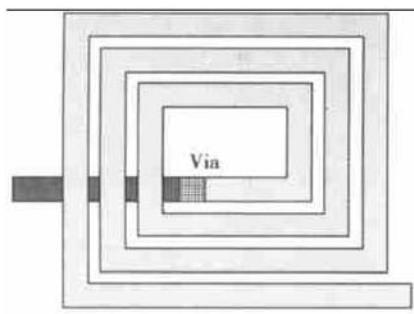


图 1 集成电感的平面示意图

Fig. 1 Layout of the spiral inductor

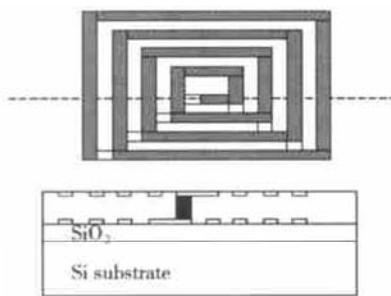


图 2 串联电感示意图

Fig. 2 Plan view and cross section of the two-metal layer series inductor

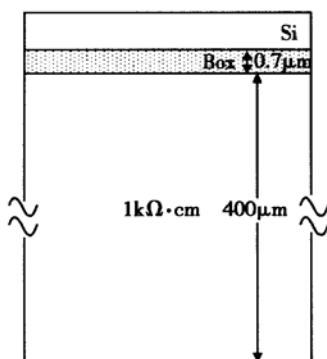


图 3 SOI 衬底结构示意图

Fig. 3 Structure of the SOI CMOS substrate

13.9GHz. 模拟结果表明, 对于大电感, SOI 衬底结构对 Q 值的改善更加明显。图 4(b) 比较了 SOI 串联电感与体硅串联电感的 Q 值及自谐振频率。SOI 衬底结构不仅解决了串联电感低 Q 值问题, 而且极大地提高了串联电感的自谐振频率, 使串联结构电感更适于高频应用。图 4(c) 比较了在 1GHz 频率下, 8.5nH 的 SOI 电感与体硅电感 Q 值随频率的变化关系。图中两个电感采用相同的结构参数(金属宽度、厚度、金属间距、电感直径)。由该图可见, SOI 电感

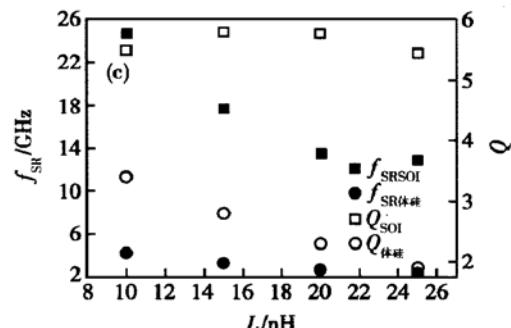
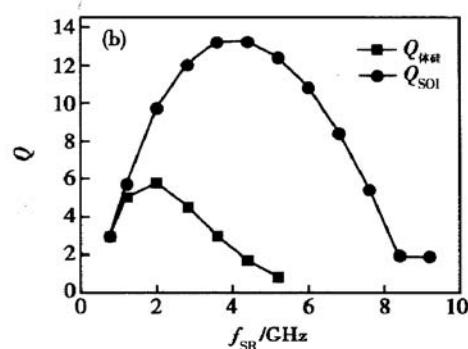
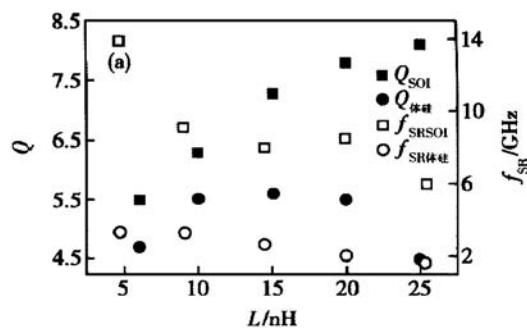


图 4 (a) SOI 非串联电感与体硅非串联电感 Q 值及自谐振频率的比较; (b) SOI 串联电感与体硅串联电感 Q 值与自谐振频率的比较; (c) SOI RF 电感与体硅 RF 电感 Q 值随频率变化关系的比较

Fig. 4 (a) Comparison of Q and self-resonant frequency of the unseries spiral inductor between SOI and silicon substrate; (b) Comparison of Q and self-resonant frequency of the series inductors between SOI and silicon substrate; (c) Q factor as a function of frequency of inductors based on SOI and silicon substrate

最高 Q 值为 13.2, 而 CMOS 电感的最大 Q 值仅为 5.8; SOI 电感 Q 最大值出现的频率为 4GHz 到 5GHz, 远远高于 CMOS 电感最大 Q 值所对应的 2GHz, 并且 SOI 电感 Q 值随频率下降也较为缓慢。综合图 4(a)、(b)、(c) 可见, 与体硅 RF 集成电感相比, SOI 电感更适于大电感及高频应用。

3 对基于 SOI 衬底 RF 电感的设计思想

3.1 基本设计思想

高频下由于趋肤效应、邻近效应^[3], 由交变磁场引起的涡流^[4]引起电感能量的损失以及由电感电流在重掺杂衬底引起的镜像电流导致的衬底能量损失使品质因数 Q 下降, 对电感设计主要是优化电感面积、金属宽度间距、中空面积以及选择低电阻率金属材料来减小损耗、提高 Q 值, 同时尽可能增加自谐振频率。

考虑到今后的应用, 本文主要模拟了工作在 1GHz 频率下电感的性能, 模拟中采用双层铝金属的 SOI 工艺。由于电感 Q 值会影响 RF 电路的性能, 如 LNA 的增益功率比, VCO 的相噪声等; 并且当工作频率超过自谐振频率, 电感阻抗呈现电容性。所以本文着重比较了设计参数变化对电感 Q 值和自谐振频率 f_{SR} 的影响。

3.2 金属宽度对电感的影响

固定金属间距 $2\mu\text{m}$, 金属厚度 $1.5\mu\text{m}$, 电感圈数为 6, 模拟比较了金属宽度对 10nH 及 20nH 矩形电感 Q 值的影响, 如图 5(a)、(b) 所示。随着金属宽度的增加, 品质因数 Q 先增加后减小。频率越高, 达到最大 Q 值对应的金属宽度越小, 亦即金属宽度增加并没有使 Q 值线性增大。在低频下电感的串联电阻主要是由金属的宽度决定, 金属越宽电阻越小。然而在高频下电感的串联电阻还受到趋肤效应、邻近效应以及涡流效应的影响, 所以在高频下, 金属宽度增加不一定使金属线圈的串联电阻减小。因此在设计中, 应该根据电感应用的频率范围及电感值的大小适当选择金属宽度。当电感应用频率范围较高时不宜选用金属线条较宽的集成电感。

3.3 金属间距对电感的影响

在模拟中固定金属宽度、厚度, 通过改变金属间距来研究邻近效应对电感品质因数 Q 的影响, 同时改变电感直径以保持电感量 10nH 。模拟结果如图 6 所示。在频率小于 4GHz (包括 4GHz) 时, 间距对电感 Q 值影响并不大。但是当金属间距、电感面积增加时, 自谐振频率下降, 因此为了保持较高的自谐振频

率和较小的电感面积, 不宜采用大金属间距。由模拟结果得出, 金属间距 $2\sim 6\mu\text{m}$ 最为合适。当频率升高到 5GHz , 邻近效应增加, 间距对 Q 值的影响变大, 金属间距适宜采用 $5\sim 7\mu\text{m}$ 。

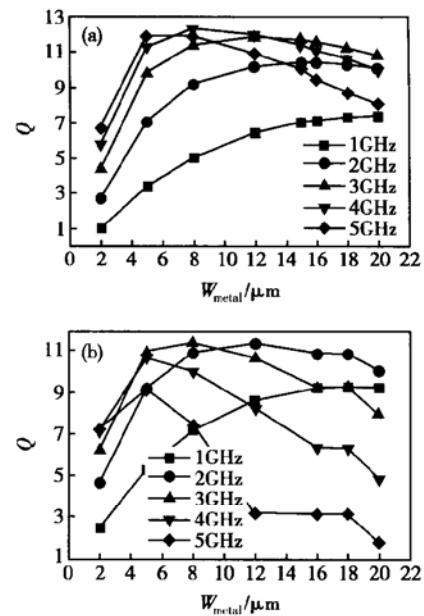


图 5 (a) 不同频率下金属宽度 10nH 电感 Q 值的影响; (b) 不同频率下金属宽度 20nH 电感 Q 值的影响

Fig. 5 Effect of metal width on Q factor of the 10nH SOI inductor in (a) 20nH SOI inductor in (b) under different frequency

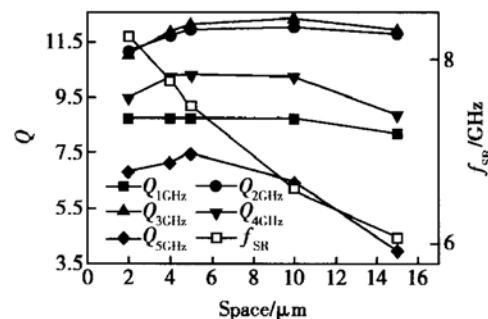


图 6 10nH 电感金属间距对 Q 值及 f_{SR} 的影响

Fig. 6 Effect of metal space on Q -factor and self-resonant-frequency of the 10nH SOI inductor

3.4 中空面积对电感的影响

固定矩形电感的金属宽度、间距及厚度, 并保持电感量为 10nH , 改变电感线圈圈数及外直径, 研究 $f = 1\text{GHz}, 2\text{GHz}, 5\text{GHz}$ 下, 中央空心面积对电感 Q 值及自谐振频率 f_{SR} 的影响, 模拟结果如图 7 所示。随着空心面积的增加, 自谐振频率减小, Q 值先略有

上升然后下降,无论是在1GHz, 2GHz 还是5GHz 的频率下,圈数为6的电感都具有最大Q值。这是由于当电感金属线圈圈数很小时,电感需要有很大的直径以达到相同的电感量,使电感串联电阻增加,Q值下降。而当螺旋集成电感具有较多金属线圈圈数,中央空心面积减小,高频下的涡流使集成电感最里面的几圈金属线的电阻急剧增大,使得电感Q值下降;根据模拟结果,4~6圈的电感适宜应用。

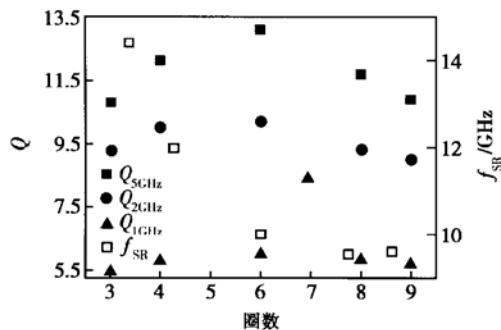


图7 不同频率下10nH电感中空面积对Q值及 f_{SR} 的影响

Fig. 7 Effect of turn number on Q factor and self-resonant frequency of the 10nH SOI inductor

3.5 串联结构电感

采用串联结构电感可以用较小的金属面积实现较大的电感量。模拟中比较了具有相同电感值的串联电感与非串联电感Q值及自谐振频率 f_{SR} ,结果如图8(a)所示。由图可见,串联电感自谐振频率 f_{SR} 较非串联电感有较大提高,但是串联电感较非串联电感Q值低,这是由于两层金属串联使电感中一些寄生效应如衬底涡流增加,导致串联电感Q值下降。图8(b)给出了工作频率为1GHz, 10nH电感Q值随频率的变化关系。串联电感Q值在频率为1GHz至2GHz时达到最大值,频率继续增加至3GHz时,电感Q值下降到2.2,这是不利于电感高频应用的。由模拟结果可见,在频率超过2GHz时不适用于采用串联电感结构。

3.6 电感形状对电感的影响

表1比较了10nH的方形、六边、八边、十二边和串联结构电感的Q值以及自谐振频率 f_{SR} 。由表1可见,对于具有相同电感值的电感,与四边、六边、八边和串联结构电感相比,十二边形电感具有最高Q值。由于串联电感是两层金属电感的串联,所以与其他三种电感结构相比,串联电感具有最小金属面积,

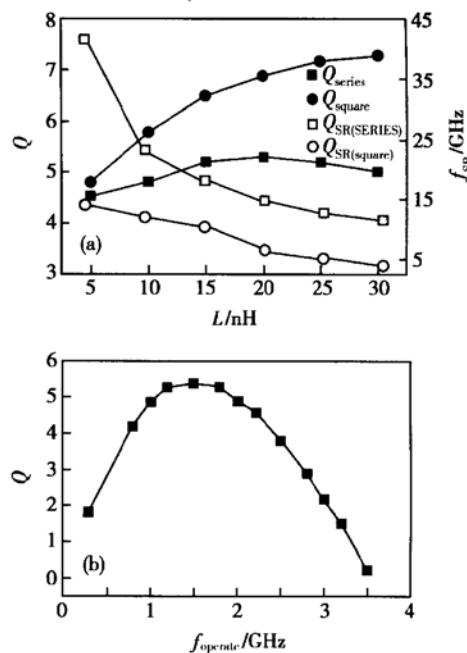


图8 (a) 串联电感与常规电感L与 f_{SR} 的比较; (b) 串联电感Q值随频率的变化关系

Fig. 8 (a) Comparison of Q-factor and self-resonant frequency between series inductors and unseries inductors; (b) Q-factor of the series inductor as a function of frequency

这就意味着串联电感的衬底寄生电容较小,自谐振频率较高,但是串联电感的Q值最低。在不需要较大自谐振频率的大电感时不推荐使用串联电感。

表1 不同形状10nH电感的特性比较

Table 1 Comparison of Q factor and self-resonant frequency among different inductors

电感形状	Q	f_{SR}/GHz
四边	6	9
六边	6.6	10.2
八边	6.7	10.3
十二边	6.8	10.5
双层串联方形电感	5.5	25

3.7 基于SOI衬底的RF集成电感综合设计

根据以上模拟仿真结果,本文综合了电感的各结构参数,提出了基于SOI衬底RF电感的最佳设计参数:

(1) 金属宽度:由模拟结果可见,Q并不是随着金属宽度的增加而单调增加,而是有一极大值。相应不同工作频率,Q达到最大值对应的金属宽度也不同。在设计中,应该根据电感应用的频率范围适当选择金属宽度。工作频率小于1GHz时,可以采用较大

的金属宽度 $15\sim 17\mu\text{m}$; 工作频率为 $1\sim 3\text{GHz}$ 时, 金属宽度应适当减小到 $10\sim 12\mu\text{m}$, 以抑制趋肤效应; 当频率升高到 $4\sim 5\text{GHz}$ 时, 趋肤效应更加明显, 此时金属宽度 $5\sim 7\mu\text{m}$ 最为适宜.

(2) 金属间距: 由模拟结果可见, 频率在 5GHz 以下, 金属间距 $2\sim 6\mu\text{m}$ 最为合适; 当频率升高到 5GHz , 邻近效应增加, 间距对 Q 值的影响变大, 金属间距适宜采用 $5\sim 7\mu\text{m}$.

(3) 中空面积(金属线圈圈数): 越靠近中心的位置电感的磁场越强, 因此中空面积越大越有利于减小涡流效应; 但是中空面积过大将增加衬底损耗, 使得 Q 值和自谐振频率下降. 特别是对于大电感值、高工作频率、金属圈数较多的电感, 中空面积太大反而使 Q 值下降, 同时使自谐振频率降低, 这是不利于电感应用的.

(4) 电感结构及形状: 根据模拟结果, 十二边形电感与矩形电感、六边、八边形电感及串联电感相比, 具有最大的 Q 值; 而在这几种结构的电感中, 串联结构的电感具有最小的金属面积和最大的自谐振频率; 但是串联电感, 特别是在高频下, Q 值不高.

因而在频率超过 2GHz 不适于采用串联电感结构.

4 结论

本文模拟了 RF 电感, 根据结果分析比较了金属宽度、金属间距、电感中空面积和电感形状结构对采用 SOI 衬底的 RF 电感品质因数、自谐振频率以及电感量 L 的影响, 提出了包括金属宽度、金属间距、电感线圈圈数和电感结构这些基于 SOI 衬底的 RF 集成电感各个结构参数的优化设计原则.

参考文献

- [1] Heng Jin, Salama C A T. A IV 1.9-GHz CDMA, CMOS on SOI, low noise amplifier. IEEE International SOI Conference, 2000: 102
- [2] Niknejad A M, Meyer R G. Analysis, design, and optimization of spiral inductors and transformers for Si RF ICs. IEEE J Solid-State Circuits, 1998, 33 (10): 1470
- [3] Kelly D, Wright P. Improvements to performance of spiral inductors on insulator. Microwave Symposium Digest of 2002 IEEE MTT-S International, 2002
- [4] Murata K, Hosaka T, Sugimoto Y. Effect of a ground shield of a silicon on-chip spiral inductor. 2000 Asia-Pacific Microwave Conference, 2000: 177

Optimization and Design of RF Inductors on SOI*

Zhao Dongyan, Zhang Guoyan and Huang Ru

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The characteristics of SOI RF inductors are compared to those of bulk RF inductors. The simulating results of the RF inductors on SOI are presented, and the effects on the inductance, quality factor, and self resonant frequency brought by the change of the inductor parameters are analyzed. Finally, some design and optimization principles of RF inductors based on SOI are suggested according to these results and analysis. The comparing way in this paper, which is based on same inductance is different from before.

Key words: SOI substrate; inductance; quality factor; self resonant frequency

EEACC: 1280; 2560

Article ID: 0253-4177(2004)06-0702-05

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA1E1590), and National Natural Science Foundation of China(No. 60306005)

Zhao Dongyan female, graduate student. Her research interest focuses on RF passive devices.

Zhang Guoyan female, post doctor. She is engaged in the research on RF devices and circuits.

Received 10 June 2003, revised manuscript received 14 August 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics