

# 硅微机械平面电感的衬底效应\*

董颖 刘泽文 丁勇

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

**摘要:** 提出了一种品质因数( $Q$ )的计算方法,分析了对于平面螺旋电感 $Q$ 值产生决定性影响的各种因素.在微机械电感传统模型的基础上对涡流效应产生的寄生电阻和有损衬底电容进行了细致的研究,并且得到了理论结果.研究结果表明, $Q$ 值的大小与几何参数和工作频率均有关.通过理论分析和计算,可以得到结构优化的方法.

**关键词:** 微机械; 电感;  $Q$ 值; 硅衬底

EEACC: 2140; 2575A; 0520

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)S0-0175-04

## 1 引言

随着射频集成电路的发展,高品质因数( $Q$ )平面螺旋电感的研究越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>.在有损硅衬底上制作出高性能电感,由于集成电路内部的各种寄生效应,电感的 $Q$ 值非常有限.

在射频条件下,衬底、金属线圈以及涡流效应都引入了寄生电容和电阻,严重影响了平面螺旋电感的性能的提高.而这些参数是受电感的几何参数以及工作频率共同影响的,对这些参数进行仔细的理论分析和计算,可以获得电感结构的优化方法,从而利用微机械方法制作出具有更高 $Q$ 值的电感.

## 2 寄生效应的物理模型

在对螺旋电感的研究过程中,许多学者都提出了由线圈的几何参数(线圈面积和形状、线圈匝数、导线的横截面尺寸以及两匝导线的间距等)得到电感电学参数的计算方法.其中,Greenhouse<sup>[2]</sup>早在七十年代就给出了计算平面螺旋电感的公式.他提出,可将矩形平面螺旋线圈按边划分为若干段直导线,线圈的电感是各段导线自感和每两段导线之间的互感之和.该公式成为我们进行电感设计的基础.然

而,这一公式没有考虑器件的几何尺寸对其品质因数的影响.

制作与 CMOS 工艺兼容的电感是我们的目标,由于这种电感制作在 CMOS 电路的硅衬底上,衬底的寄生效应以及电感线圈的寄生效应很严重,影响电感的性能.这些寄生效应可以通过一定的等效元件表示,如图 1 所示.

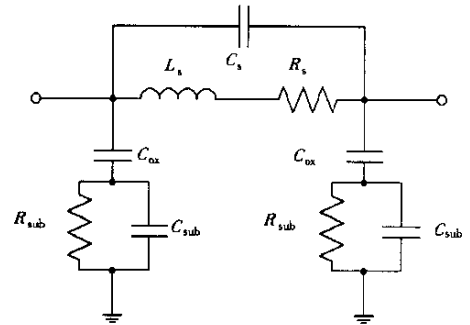


图 1 CMOS 工艺平面螺旋电感等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of planar inductor on lossy silicon substrate

图中平面螺旋电感与衬底之间由绝缘层隔开.这样就在线圈和衬底之间形成了一个从电感线圈到硅衬底的寄生电容.这是一个普通的平板电容器,其值用经典电学方法容易求出.由于电感线圈占的面积很大,所以这个寄生电容的值很大,会极大地影响

\* 国家重点基础研究发展规划资助项目(No. G1999033105)

电感的性能. 设二氧化硅绝缘层的厚度为  $t_{\text{ox}}$ , 介电常数为  $\epsilon_{\text{ox}}$ , 电感导线的长度和宽度分别为  $l$  和  $\tau w$ , 则此寄生电容的值为<sup>[3]</sup>:

$$C_{\text{ox}} = l\tau w \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}} \quad (1)$$

图中其他参数的意义分别为:

衬底寄生电容  $C_{\text{sub}}$ , 它是导电衬底的分布电容:

$$C_{\text{sub}} = l\tau w C_{\text{unit}} \quad (2)$$

衬底漏电阻  $R_{\text{sub}}$ , 是硅衬底的分布电阻.

$$R_{\text{sub}} = 1/(l\tau w G_{\text{sub}}) \quad (3)$$

各线圈之间的寄生电容  $C_s$ , 对于平面螺旋结构电感, 两层金属线与中间的绝缘层构成一个电容. 这个电容与金属线的宽度、金属线重叠次数有关:

$$C_s = n\tau w^2 \frac{\epsilon_{\text{insulate}}}{t_{\text{insulate}}} \quad (4)$$

式中  $n$  为上下层金属的重叠的次数即电感线圈的匝数;  $w$  为线圈宽度;  $t_{\text{insulate}}$  为上下两层金属间绝缘层厚度;  $\epsilon_{\text{insulate}}$  为绝缘层的介电常数.  $C_s$  的形成如图 2 所示.

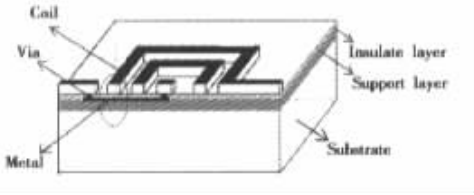


图 2 电感示意图及  $C_s$  的形成

Fig. 2 Schematic inductor and formation of  $C_s$ .

总寄生电阻  $R_s$ , 它由以下三部分电阻构成:

$R_{\text{line}}$ : 线圈寄生电阻. 不管螺旋线圈由何种金属构成, 其电导率是有限的, 这就等效于存在一个与电感串联的寄生电阻. 对于应用在移动通信领域的电感而言, 由于工作频率很高, 导体的趋肤效应将非常明显, 显著改变导体的导电特性.

$R_{\text{se}}$ : 衬底涡流损耗等效寄生电阻. 由于线圈的衬底为硅衬底, 具有一定的导电性能. 当工作频率很高时, 导电衬底中就会产生感应电流, 这样就等效于一个与电感串联的电阻在消耗能量. 此寄生电阻的计算极为复杂, 粗略分析表明, 此电阻一般可忽略.

$R_{\text{me}}$ : 导线涡流损耗等效寄生电阻. 当信号频率很高时, 在线圈的金属导线中同样会产生涡旋感应电场, 这种涡流损耗的能量损失是螺旋电感功耗的重要组成部分, 是造成电感在高频下  $Q$  值下降的重要原因.

下面我们首先讨论  $R_{\text{line}}$  的计算, 由于在考虑趋肤效应时导体的阻抗为<sup>[4]</sup>:

$$Z = \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \times \frac{\text{ch} \frac{\tau}{2d} (1+j)}{\text{sh} \frac{\tau}{2d} (1+j)} \times e^{j\pi/4} \quad (5)$$

式中  $Z$  是宽度为  $b$ 、厚度为  $\tau$  的矩形截面导电薄片单位长度的阻抗, 它乘以总长度即可得到总阻抗.  $d$  为高频下导体的趋肤深度:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (6)$$

式中  $\omega$  为线圈中信号的角频率;  $\mu$  为导体的磁导率;  $\sigma$  为导体的电导率. 通过 (5)、(6) 两式可计算  $R_{\text{line}}$ .

欲对涡流等效寄生电阻  $R_{\text{me}}$  进行计算, 必须认真研究其物理成因.

如果  $I_{\text{coil}}$  为电感线圈中的电流, 它将产生磁场  $B_{\text{coil}}$ . 由于线圈中信号的频率很高, 所以  $I_{\text{coil}}$  和  $B_{\text{coil}}$  都以很高的频率变化. 在靠近中心处, 高频磁场从导体中穿过, 由法拉第电磁感应定律和楞次定律, 在线圈导线中就会产生感应电流  $I_{\text{eddy}}$  和感应磁场  $B_{\text{eddy}}$ . 线圈越厚, 感应电流  $I_{\text{eddy}}$  就越大, 消耗的能量越多. 这样就等效于一个寄生电阻  $R_{\text{me}}$ . 其功率消耗可用下式进行计算:

$$P_e = \frac{(\pi t f B)^2}{6\rho} \quad (7)$$

式中  $t$  为导线的宽度;  $f$  为工作频率;  $B$  为导体所在处的磁场;  $\rho$  为导线的电阻率;  $P_e$  为单位体积导体消耗的功率. 将  $P_e$  乘以磁场相同处导线的总体积, 再对整个线圈求和, 即可求出线圈中涡流消耗的总能量  $P_a$ . 由电磁学理论可以得到:

$$R_{\text{me}} = \frac{P_a}{I_{\text{coil}}^2} \quad (8)$$

只要计算出导线所在处的磁场强度, 就可以计算出涡流等效电阻. 导线所在处的磁场强度由三个组成部分:

$$B_n = B_{n,n} + B_{n,\text{in}} + B_{n,\text{out}} \quad (9)$$

式中  $B_n$  为第  $n$  匝导线所在处的总磁场,  $B_{n,n}$  为第  $n$  匝导线本身在此处产生的磁场,  $B_{n,\text{in}}$  为第  $n$  匝导线以内的各匝线圈在此处产生的磁场,  $B_{n,\text{out}}$  为第  $n$  匝导线以外的各匝线圈在此处产生的磁场. 它们的计算公式如下<sup>[5]</sup>:

$$B_{n,n} = \frac{\mu_0 I}{4\pi d_n} \left( \frac{\sqrt{5}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{4} \right) \quad (10)$$

$$B_{n,in} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{k=1}^{n-1} \left( -\frac{\sqrt{d_k^2 + (d_n - d_k)^2}}{d_k(d_n - d_k)} + \frac{\sqrt{d_k^2 + (d_n + d_k)^2}}{d_k(d_n + d_k)} + \sqrt{2} \frac{d_n}{d_n^2 - d_k^2} - \frac{\sqrt{(d_n - d_k)^2 + (d_n + d_k)^2}}{d_n^2 - d_k^2} \right) \quad (11)$$

$$B_{n,out} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{k=n+1}^N \left( \frac{\sqrt{d_k^2 + (d_k - d_n)^2}}{d_k(d_k - d_n)} + \frac{\sqrt{d_k^2 + (d_k + d_n)^2}}{d_k(d_k + d_n)} + \sqrt{2} \frac{d_n}{d_k^2 - d_n^2} + \frac{\sqrt{(d_k - d_n)^2 + (d_k + d_n)^2}}{d_k^2 - d_n^2} \right) \quad (12)$$

式中  $I$  为线圈中的电流;  $d_n = l_n/8$ ,  $l_n$  为第  $n$  匝线圈的长度。

由(5)~(12)式,可求出电感的线圈寄生电阻  $R_{line}$  和  $R_{me}$ ,从而得到总电阻  $R_s$ 。由此,通过下列计算公式,即可获得几何参数以及衬底条件下电感的  $Q$  值随频率的变化:

$$Q = \frac{\omega L_s}{R_s} \times \frac{R_p}{R_p + [1 + (\omega L_s/R_s)^2]R_s} \times [1 - (C_p + C_s)(\omega^2 L_s + R_s^2/L_s)] \quad (13)$$

其中

$$R_p = \frac{1}{\omega^2 C_{ox}^2 R_{sub}} + \frac{R_{si}(C_{ox} + C_{sub})^2}{C_{ox}^2} \quad (14)$$

$$C_p = C_{ox} \times \frac{1 + \omega^2(C_{ox} + C_{sub})C_{sub}R_{sub}^2}{1 + \omega^2(C_{ox} + C_{sub})^2 R_{sub}^2} \quad (15)$$

### 3 结果和讨论

运用以上的理论模型和所获得的分析公式,我们编制了一个计算品质因数程序。通过该程序可对平面电感进行优化设计。图3给出一个计算结果,其中电感的圈数为  $N=7.5$ ,内径为  $ID=20\mu\text{m}$ ,电感金属厚度  $t=3\mu\text{m}$ ,宽度  $W_a=W_b=13\mu\text{m}$ 。曲线  $a$  描述了 MEMS 工艺制作的电感的  $Q$  值,此时不存在衬底寄生效应。而曲线  $b$  描述了 CMOS 工艺制作电感的品质因数值,此时  $Q$  值受到衬底寄生效应的影响。黑色圆点和方块分别为这两种情况下的品质因数的测量值<sup>[6]</sup>。从图中很容易看出,在没有衬底寄生效应影响的情况下,电感的  $Q$  值可以得到比较显著的提高。所以在可能的情况下,应该尽量地采取特殊工艺去除衬底。

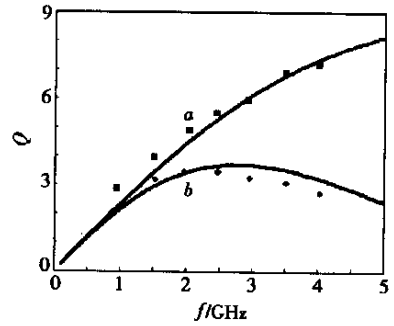


图3  $Q$  值与频率的关系

Fig. 3  $Q$  value of a planar spiral inductor as the function of the frequency

电感工作于较低的频率时,  $R_{line}$  是寄生效应的主要组成部分,随着频率的增高,  $R_{line}$  缓慢地上升。此时  $Q$  值的变化主要由  $\omega L_s$  的变化引起。随着频率的增高,  $Q$  值逐渐增大。由于  $R_{line}$  的大小与电感线圈的截面积成反比,所以在频率较低的情况下导线横截面更宽或更厚的线圈具有更高的  $Q$  值。

随着频率的增高,涡流损耗寄生电阻  $R_{me}$  的影响变得越来越明显,总寄生电阻随频率的提高而显著增大,此时,电感的  $Q$  值将会随着频率的提高而下降。同时,横截面积小的导线中涡流损耗掉的能量较少,使得导线具有更小的  $R_{me}$ ,所以在频率较高的情况下导线横截面更窄或更薄的线圈具有更高的  $Q$  值。

电感受到衬底寄生效应的影响,所以  $Q$  值非常有限。在其他条件都相同的情况下,线圈较宽的电感有着较小的  $R_{line}$  值。这一现象是由于趋肤深度造成的,因为较宽的线圈有着更大的有效传输面积。所以线圈宽度较大的电感品质因数最大值比线圈宽度较小的电感的品质因数最大值要高。但是在不同的频率下,存在一个使  $Q$  值最大的线圈几何尺寸。如工作在 1GHz 的时候,  $20\mu\text{m}$  宽线圈电感是最佳的选择,可以得到将近 5 的  $Q$  值;但是当工作频率上升到 3GHz 或者更高的时候,  $10\mu\text{m}$  线圈电感就是最佳的选择了。结论就是,当其他的工作条件都相同的时候,在较低的工作频率下,线圈较宽的电感可以得到更高的  $Q$  值;而在较高的工作频率下,线圈较窄的电感可以得到更高的  $Q$  值。在设计电感的过程中,因该根据电感的工作频率来设计几何尺寸。

由于不受衬底寄生效应的影响,电感的  $Q$  值得到了非常明显的提高。所以如果可能的话,采取特殊

工艺去除衬底将会使电感的  $Q$  值得到较大程度的提高。

## 4 结论

平面螺旋电感的  $Q$  值受到多方面的影响,其中衬底寄生效应和涡流效应是最重要的两个因素.在不同的频率下,存在一个使  $Q$  值最大的线圈几何尺寸。

### 参考文献

- [ 1 ] Long J R, Copeland M A. The modeling, characterization and design of monolithic inductors for silicon RF IC's. IEEE J Solid-State Circuits, 1997, 32(3): 357
- [ 2 ] Greenhouse H M. Design of planar rectangular microelectronic inductors. IEEE Trans Parts, Hybrids, and Packing, 1974, PHP-10(2): 101
- [ 3 ] Yue P C, Ryu C, Lau J, et al. A physical model for planar spiral inductors on silicon. Electron Devices Meeting Tech Dig, 1996: 155
- [ 4 ] Yu Dayuan. Encyclopedia of China-Physics II, Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1987: 865 (in Chinese)
- [ 5 ] She Shouxian. Encyclopedia of China-Physics II, Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1987: 1066 (in Chinese)
- [ 6 ] Park M, Lee S, Kim C S, et al. The detailed analysis of high  $Q$  CMOS-compatible microwave spiral inductors in silicon technology. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45(9): 1953

## Substrate Effects of Micromachined Planar Inductor\*

Dong Ying, Liu Zewen and Ding Yong

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A calculation method for the  $Q$  value of planar inductor is presented. The effects that determine the merit of planar spiral inductor are analyzed. Based on an electrical model of the micromachined inductor, eddy current effect induced parasitic resistance and the capacitance due to the lossy substrate are carefully studied. The obtained theoretical result shows the  $Q$  value is related to both the inductor geometric size and the operating frequency. An optimized planar inductor can be realized through the theoretical analysis and calculation.

**Key words:** micromachining; inductor;  $Q$ -value; silicon substrate

**EEACC:** 2149; 2575A; 0520

**Article ID:** 0253-4177(2003)S0-0175-04

\* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G1999033105)