

# 小尺寸传感应用的高电感平面线圈的设计和制造

瑞士联邦高等工学院 (EPFL) J. Poliakine, Y. Civet, Y. Perriarda

**摘要:**这项工作致力于设计和制造具有大量匝数 ( $>100$ ) 和高达  $32 \mu\text{H}$  自感的小型平面线圈，适用于增强电感式传感器的性能。首先，改良后的惠勒公式用于确定最佳匝数以实现最高电感。然后，介绍一种简单在硅衬底上溅射铝的基于感应耦合等离子体 (ICP) 蚀刻的工艺流程，并讨论了工艺的关键方面。最后，制作出的线圈进行电学和形态表征，而与模型相比，测量结果显示与理论预测相符。

**关键词:**平面线圈，电感式传感器，铝加工，等离子刻蚀，电感

## 1 介绍

在不同类别的传感器中，基于感应的器件具有一些主要优点，因此特别适合于恶劣条件下操作，例如潮湿或肮脏的环境。近年来，业界提出了几种电感式传感器，包含用于不同应用的小型平面线圈。

但是，随着器件尺寸的减小，高电磁性变得越来越难以实现。事实上，MEMS 测量的平面电感通常只有有限数量的匝数（通常  $<50$ ），并且自感值约为几百 nH。在这种情况下，技术关键点是增加平面线圈的匝数密度，同时保持导体截面足够大，以限制欧姆损耗和焦耳热。无论何时平面线圈必须与铁磁元件相互作用，应用都需要强大的电磁耦合。目前的工作旨在通过提出并验证一个简单有效的流程来完成上述任务，以解决这个问题。

## 2 设计

平面电感器的设计策略可能会有很大的变化，这取决于应用和条件限制。这里我们选择将，边长为 3mm 的方形线圈的自感进行最大化。为了包含技术范围 (technological domain) 并简化设计，线圈尺寸被视为固定参数，匝数是唯一的优化变量。

我们特别考虑了 4 种类型的线圈，其中线圈的宽度范围为 6 到  $9 \mu\text{m}$ ，所有线圈的匝与匝之间的间距是相同的，并且等于  $3 \mu\text{m}$ 。我们是在对用于制造的技术限制进行初步分析之后，才选择这些数值。自感是通过使用改进的惠勒公式来确定，其中  $\mu_0$  是真空的磁导率，系数  $K_1$  和  $K_2$  是经验系数，取决于线圈形状， $n$  是匝数， $d_{avg}$  是平均直径，

$\rho$  是线圈的填充率。由于该公式没有考虑已知对自感产生影响的高频激活的任何效应（例如趋肤效应和邻近效应），因此有效范围仅限于低频。材料依赖现象也不被考虑。

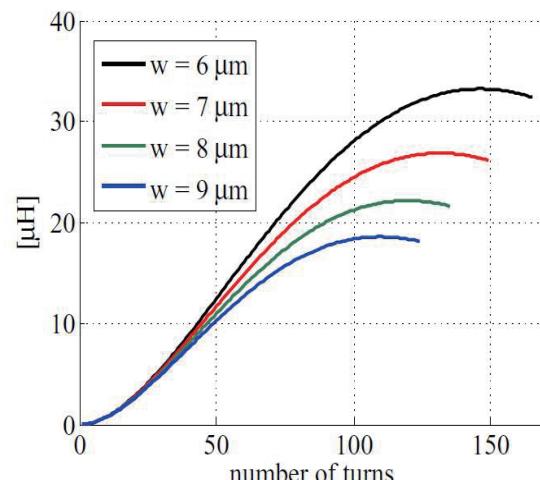


图 1 线圈（具有不同匝宽）的匝数与自感的函数关系

表 1: 不同线圈类型的优化结果

Turn width ( $\mu\text{m}$ )	spacing ( $\mu\text{m}$ )	optimal number of turns	$L_{max}$ ( $\mu\text{H}$ )
6	3	146	33.2
7	3	131	26.9
8	3	119	22.2
9	3	109	18.6

$$L = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{avg}}{1 + K_2 \rho}$$

上述公式可实现每种线圈类型的匝数与自感的函数计算（图 1）。优化结果列于表 1。

### 3 制作

图 2 中报告了工艺流程的示意截面图。第一步包括在硅 /  $\text{SiO}_2$  衬底上溅射  $8\mu\text{m}$  铝层。然后，在表面上旋涂  $10\mu\text{m}$  的 AZ9260 光致抗蚀剂层，并用  $405\text{nm}$  激光二极管直接曝光。最后，使用基于  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$  等离子体蚀刻铝，并且剥离残留的光刻胶。虽然制造概念是已知的，但这里所采用的工艺流程被进行了优化，以增加匝密度，同时仍然保持导体的高厚度，从而减少欧姆损耗。在这个意义上，为了补偿蚀刻技术在各向异性和不均匀性方面的限制，已经做出了特别的努力。这是在不同的层次上进行的，从而修改设计以确保衬底均匀暴露于  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$  等离子体，还测试了不同的曝光参数以进行有效的光致抗蚀剂图案化。

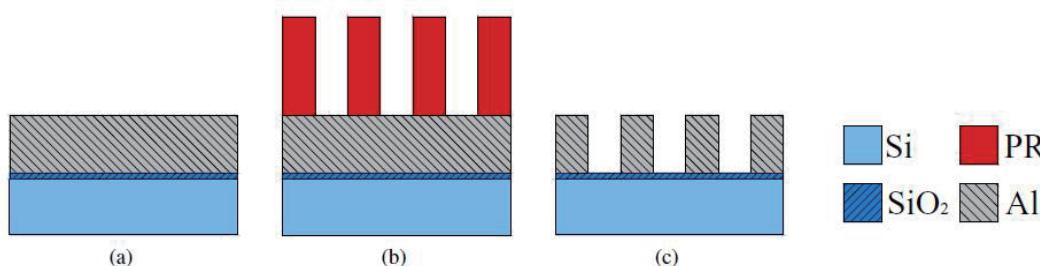


图 2 工艺流程示意图：(a)  $8\mu\text{m}$  铝的溅射, (b)  $10\mu\text{m}$  厚抗蚀剂 AZ9260 上的光刻, (c) 深 ICP 蚀刻和抗剥离

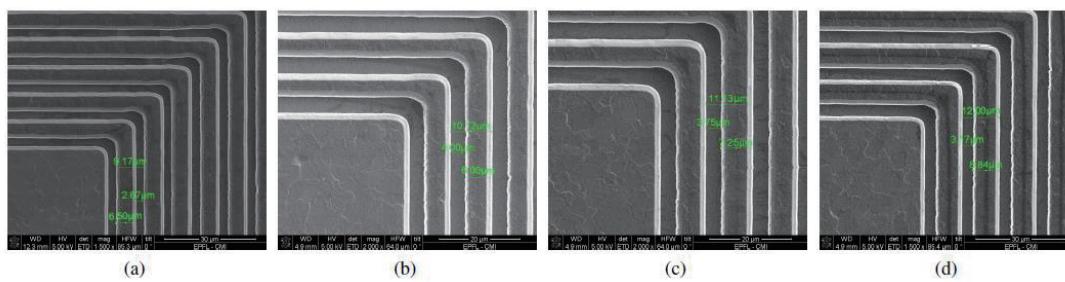


图 3 具有不同主匝宽度的完成线圈的 SEM 图像：(a)  $6\mu\text{m}$ , (b)  $7\mu\text{m}$ , (c)  $8\mu\text{m}$ , (d)  $9\mu\text{m}$

## 4 表征与测量

### 4.1 形态

图 3 显示了完成线圈的 SEM 图像。如图可观察到，相对于其标称值，导体的实际宽度有所减小。这个预期的结果与蚀刻技术直接相关，蚀刻技术允许蚀刻具有几乎垂直壁的图案，但仍然远不是  $100\%$  各向异性的。在此过程中会蚀刻大约  $1\mu\text{m}$  的宽度。导体厚度是采用双重方法测量。首先，通过 SEM 成像（图 4a）测量厚度，然后使用光学轮廓仪进行第二次测量。测量基本上一致，并显示略高于  $7.7\mu\text{m}$  的厚度。

### 4.2 电气行为

线圈的测量是采用 Agilent 4294A 精密阻抗分析仪进行的，在几 kHz 至  $800\text{kHz}$  范围内执行扫频。选择这一范围是为了减少测量的不确定性，同时未激活模型中未考虑到的任何高频效应。出于同样的原因，用于仿真的线圈的参考电路可以被简化为一个集总的 R-L 偶极子。结果请看表 2 和 3。

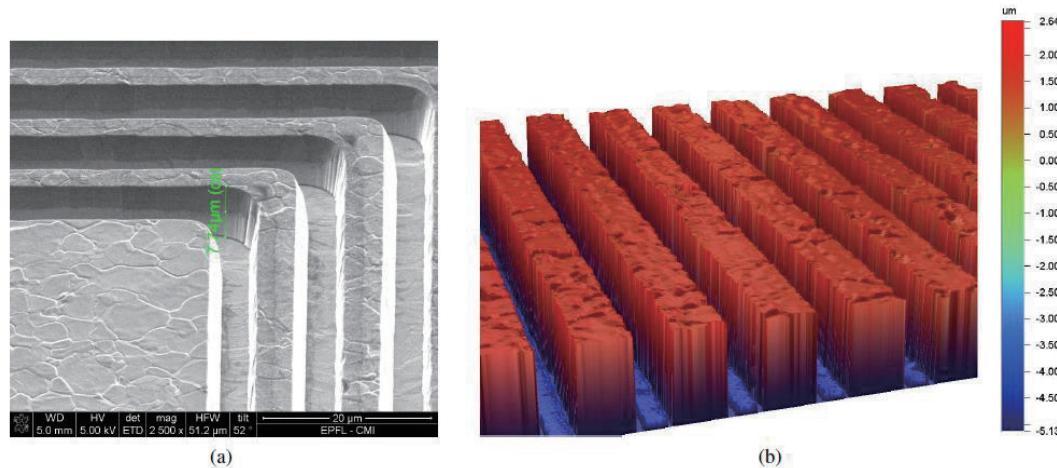


图 4 完成线圈上的厚度测量：SEM 测量图（a），3D 光学轮廓图（b）

表 2：直流电阻测量和比较

Turn width ( $\mu m$ )	Theoretical ( $k\Omega$ )	Measured ( $k\Omega$ )	dev.
6	0.956	1.034	7.5%
7	0.716	0.691	1.6%
8	0.557	0.503	10.7%
9	0.446	0.439	3.5%

表 3：自感测量和比较

Turn width ( $\mu m$ )	Theoretical ( $\mu H$ )	Measured ( $\mu H$ )	dev.
6	33.2	33.8	1.8%
7	26.9	25.4	5.6%
8	22.2	20.9	5.8%
9	18.6	17.7	4.8%

## 5 结论

我们设计和制造了四种具有高匝数的平面线圈。首先，利用改进的惠勒公式，我们找到了最佳匝数，旨在最大化自感。然后，提出基于铝等离子体蚀刻的工艺流程并用于制造这种器件。通过 SEM 成像和光学轮廓测量进行的表征表明，这种工艺流程对于密度高达  $0.11 \text{ 线} / \mu \text{m}$  和相对高厚度 ( $>7.7 \mu \text{m}$ ) 的铝互连的制造是有效的。最后，电

气测量结果显示自感值约为几个  $\mu\text{H}$ ，与理论预测完全一致。本文所提出的制造方法是高度可控的，并且只需有限数量的制造步骤，因此在那些空间受限而需要高感应特性的应用中，使得它特别通用且方便。

## 参考文献

- [1] P. H. Lo, C. Hong, S. C. Lo, W. Fang, Implementation of inductive proximity sensor using nanoporous anodic aluminum oxide layer, in: 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2011, pp. 1871 - 1874.
- [2] C. Zhang, L. Guo, L. F. Wang, J. Q. Huang, Q. A. Huang, Passive wireless integrated humidity sensor based on dual-layer spiral inductors, Electronics Letters 50 (2014) 1287 - 1289.
- [3] Q. Tang, D. Peng, L. Wu, X. Chen, An inductive angular displacement sensor based on planar coil and contrate rotor, IEEE Sensors Journal 15 (2015) 3947 - 3954.
- [4] H. A. Wheeler, Simple inductance formulas for radio coils, Proceedings of the Institute of Radio Engineers 16 (1928) 1398 - 1400.
- [5] S. S. Mohan, M. del Mar Hershenson, S. P. Boyd, T. H. Lee, Simple accurate expressions for planar spiral inductances, IEEE Journal of Solid-State Circuits 34 (1999) 1419 - 1424.

下转152页