

基于MCM-L技术的一种集成电感器性能分析

Analysis of the performance for Integrated Inductor Based on MCM-L Technolog

薛蕙 编译

摘要: 文章介绍采用叠层基片上的多芯片组件 (MCM-L) 技术制造的集成电感器, 同时分析该组件在典型的射频电路中的应用。这种集成电感器与分立式电感器比较, 具有可靠性高、性能优良、成本较低等优点。

关键词: MCM-L技术 (叠层基板上的多芯片组件技术), 集成电感器, 性能分析, 射频电路

中图分类号: TN86 文献标识码: A 文章编号: 1606-7517(2016)10-7-146

1 引言

众所周知, 射频电路中广泛使用分立式片状电感器, 其 Q 值高。而将电感器集成在硅 (Si) 基片上, 使其包含在射频信号处理芯片中的技术, 则会使该电感器的 Q 值受到限制, 影响其性能与效率。采用 MCM-L 技术, 在射频放大器电路板上集成的电感器是一类低成本的工艺技术。其与分立式电感器相比较, 具有可靠性高、电性能优、成本低廉等优点, 同时还可以获得高的品质因数 Q 值。MCM-L 技术的示意图见图 1 所示。图 1 中包含了集成在射频放大器内部叠层上的电阻器、电容器和电感器绕组。本文介绍的 MCM-L 技术制造集成电感器的工艺, 建立在电感值为 1 ~ 100nH 的单层空芯螺旋线电感器的设计前提下。初期的制作工艺是采用普通印制电路板 (PCB) 的制作方法, 可以比较容易地将以上量值的那些电感器包含到 $5 \times 5\text{mm}^2$ 的占空面积上, 其制成的这种电感器的 Q 值将大于 70, 性能与广泛应用的分立式电感器不相上下。在本文

的设计中, 是将 $L=1 \sim 100\text{nH}$ 的电感器集成在 $2.5 \times 2.5\text{mm}^2$ 的占空面积上, 这相当于普通的 1210 片式元件的尺寸。文章还将研究电感器电感值的允许偏差和其 Q 值对一种射频放大器设计性能的影响。该放大器中包括 5 个电感器, 其中两个电感器提供宽带稳定性; 其余三个电感器用于阻抗变换和匹配。同时还针对其各种不同的功能, 探讨了集成电感器的电感值允许偏差和对 Q 值的影响。

设计的集成电感器模型包括了电阻和电容等高频参数。采用有限元分析法和用 Ansoft Maxwell 软件包预测各个阻抗参数随频率的变化, 并用不同的几何图形模型表示出因为 MCM-L 加工中的限制因素所产生的尺寸变化。还用制成的电感器和 Q 值预测放大器对电感器允许偏差的敏感性作了研究。采用 SPICE 电路模型探讨了已知电感值范围内, 放大器的增益和反射系数与频率之间的关系。

此外, 文章还从设计布局和工艺技术方面研究了改善集成电感器性能的一些方法。如加工中要考虑铜箔的深腐蚀和通孔电镀的影响, 以使得印制导体的外形与设计一致。对一系列用新工艺技术制作的元件进行检测的结果, 证实了集成化元件参数的允许偏差有了改善。

2 基于 MCM-L 技术的射频电感器

近些年来, 随着小型化、便携式以及可穿戴等电子产品的不断发展, 电路密度的增加有力推动了集成无源元件和 MCM 技术的发展进度。用于射频电路的一些分立片式元件逐步被替代。

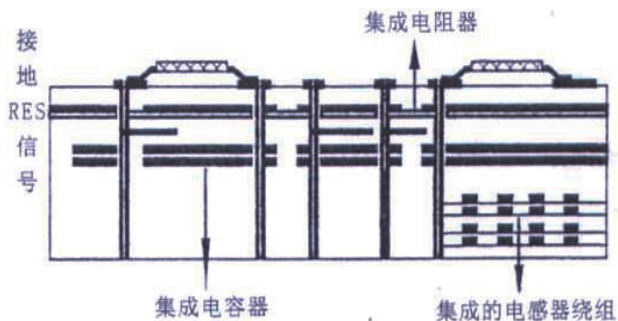


图 1 基于 MCM-L 技术集成的无源元件

制作射频电路应用的 MCM-D (淀积在材料上的多芯片组件) 技术与硅 (Si) 基片相结合的射频集成电路已经很成熟。以 MCM-L 技术制作的集成电感器用于射频电路具有集成电路所有的优点, 没有 MCM-D 技术所受到的那些限制因素。在绝缘的叠层基板上形成的空芯结构绕组, 可以消除与半导体硅基体有关的问题。用于 MCM-L 技术的铜导体电阻率比普通金属膜低, 并且在印制电路板上可以电镀比 Si 基片上更厚的铜层, 以得到较高的 Q 值。因此, 以 MCM-L 技术设计制作的集成绕组, 可以与分立片式电感器的性能相当, 同时还比分立片式电感器的成本低廉。

图 2 是一种用 MCM-L 技术制成的典型的圆形螺旋线圈型线圈电感器, 其线圈匝数为 2.5 匝, 导体的宽度和间隙均为 $100\mu\text{m}$, 导体高度为 $17.5\mu\text{m}$ 。线匝印制在基板的一侧, 因此是一种单层器件。但是, 为了提供从线匝中心到基板底侧接点的通道, 还需要另置一个导电层。对如图 2 所示的螺形电感器进行测试: 在 $5\times 5(\text{mm}^2)$ 占空面积上, 测得的电感值达到 270nH , Q 值约为 $50\sim 60$ 。本文是介绍 $2.5\times 2.5(\text{mm}^2)$ 占空面积上设计制作了类似于 MCM-L 技术的系列器件, 用于射频电路。其电感值和 Q 值等性能见表 1 所列, 并与一般工业生产的片式电感器有关性能进行了比较。从表 1 可见, MCM-L 集成电感器的性能、电感值、Q 值这些指标与现用的片式电感器性能相近, 两种电感器具有相近的标准尺寸: 0805; 更小的片式尺寸 (如 0603、0402) 也可以制成。但从容纳分立元件所需的空间尺度过考虑, 其印制电路板需要大一些。此外, MCM-L 器件也可以制作在内部印制板上, 则并不需要占用射频电路印制板表面的面积。在所有情况下, MCM-L 器件的自共振频率都超过片式电感器要求的值, 因此, 完全可以工作在至少 1GHz 电路中; Q 值高达 90, 大大超过了工业生产



图 2 MCM-L 技术制作的集成空芯电感器照片

片式元件要求的等效最低值。用标准印制电路板的工艺技术制作这些元件, 可以改进工艺方法来提高 Q 值。

表 1 MCM-L 集成电感器与普通射频

片式电感器的性能比较

电感器	L	Q	SRF (GHZ)
0805	(3.3 ~ 8.2) $\pm 0.3\text{nH}$	50 (800MHz 以下)	6.0 ~ 3.0
	(10 ~ 27) $\text{nH} \pm 5\%$	40 (800MHz 以下)	2.5 ~ 1.6
片式	(33 ~ 220) $\text{nH} \pm 5\%$	18 (100MHz 以下)	0.3 ~ 1.4
	(4.9 ~ 28.4) $\text{nH} \pm 5\%$	60 (500MHz 以下)	6.0 ~ 3.0
MCM-L	(33 ~ 200) $\text{nH} \pm 5\%$	30 (100MHz 以下)	3.0 ~ 1.1

注: 表中 SRF 为电感器的自共振频率, SRF 值是用有限元法模拟的。

3 射频放大器设计

图 3 是本文阐述的工作在 $800\sim 950\text{MHz}$ 的低噪声放大器电路的原理图。这是以一个 NPN 双极晶体管 (NEC68719) 为中心, 并包括了为满足增益和噪声要求所必需的相关无源元件。该设计根据的技术要求为两个 50Ω 负载终端之间的增益至少为 12dB ; 噪声指数小于 1.3dB 。还规定在整个频段内增益的波动为 $\pm 0.5\text{dB}$, 输入/输出反射系数小于 0.33dB 。设计电路时, 采用了传统的增益方法, 以此调整源阻抗, 以满足噪声要求, 然后使输出与最大增益匹配。电路使用了五个电感元件, 其电感值为 $1\sim 24\text{nH}$ 。当与 1nH 发射极 (反馈) 电感器相连接时, 24nH 的电感器和 75Ω 的电阻器串联提供宽带稳定性。 1nH 电感器还有第二个功能, 即它可改变电路的输入阻抗, 当放大器调谐到最小噪声时, 增益提高。对电路研究发现, 稳定性电路可以获得增益和噪声指数为 0.38dB 的源反射系数, 在其工作中可获得高达 13dB 的增益, 同时保持噪声指数低于 1.3dB 。在输入串联 8nH 分路电感器和 5.1pF 电容器时可实现这一点。选用这种方法胜过其它组件, 以便于加入直流偏置。输出端的两个电感器 (12nH 和 22nH) 与 1pF 电容器相连, 使 50Ω 负载与输入端相匹配, 以获得最大增益。在此, 采用了三个元件而非二个元件扩大放大器的选择性, 还同时提高了电路的 Q 值。

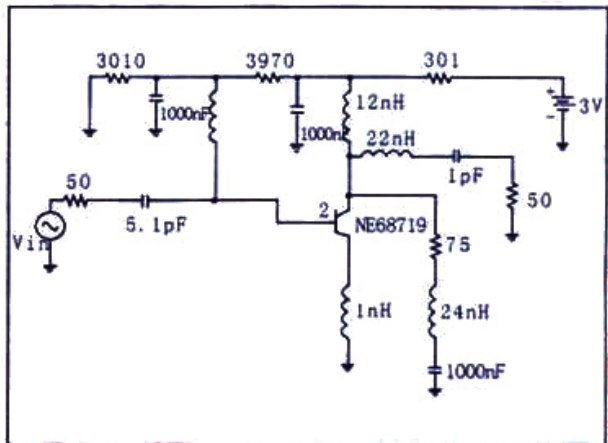


图3 900MHz 射频放大器电路原理图

4 电感器性能分析

此节探讨上述各类电感器的性能如电感值的允许偏差和Q值对射频放大器性能的影响。但不包括1nH发射机电感器的分析，因为其这类性能指标误差很可能是印制电路板上的导体长度引起的，而不是由一个分立的螺旋形绕组造成的。所以在各种情况下都假设电感值的最大允许偏差为±10%，Q值范围为5~10。

4.1 保证射频稳定性的输入RL组件

在射频放大器设计中，要求晶体管在整个工作频段内达到稳定，使电路可以在该频段内有效地工作，为此，必须限制带外振荡。以上谈到，宽带的稳定性是在输出端由一个75Ω电阻器和一个24nH电感器串联而实现的。用单一电阻器也可以实现同样的功能，但是，为实现低频段稳定性所采用的电阻值，限制了高频下电路的增益。例如，如果从图3所示的电路图中取消24nH的电感器，则预测在900MHz下的最大增益为9.5dB；若存在24nH这个电感器，则预测在900MHz下的最大增益为13.3dB。这样，在放大器增益和稳定性之间折衷：最佳电感值可定为可提供最大增益，同时又在晶体管整个工作频段内保持稳定性的那个电感值。

射频放大器电路的稳定性可用稳定性常数 μ 来度量：

$$\mu = \frac{1 - |S_{22}|^2}{|S_{11} - \Delta S_{22}^*| + |S_{21} S_{12}|} \quad (1)$$

当 $\mu > 1$ 时的电路是绝对稳定的，较大的 μ 值表

示具有较好的稳定性。图4所示的曲线说明图3电路中的24nH电感器是如何提供临界稳定性的。在这种情况下，可以允许存在10%的偏差，但任何进一步增大偏差，都会导致在某个频段的不稳定性。为了比较，图4中还画出了在L=0nH时的情况。以上结论是建立在理想电感器（即其Q值为无穷大）的假设基础上的。当电感器模型中包含电阻值时，有限的Q值对稳定性的影响如图5所示。在图5中，可以看到Q值小于10会在一个有限的频段内产生不稳定性，因此，即使电感器的允许偏差很严格， $Q < 10$ 的器件也会使电路工作变得不稳定。这时，应选择能给电路提供最大增益的电感值。但是，如果电路仅处于临界稳定状态，则电感值允许的偏差和电阻值联合产生的影响，会足以在相当宽的频段内产生不稳定性。这时使用较小的电感值是一种比较可靠且有效的解决稳定性的方法。表2列出了电路增益与24nH电感器参量之间关系的研究结果。

表2 在900MHz时，可获得的增益GA与

24nH电感器允许偏差和Q值的关系

GA (dB)	Q=100	Q=20	Q=10	Q=5
L=21nH	12.91	12.88	12.85	12.80
L=24nH	13.30	13.25	13.21	13.14
L=27nH	13.62	13.56	13.52	13.43

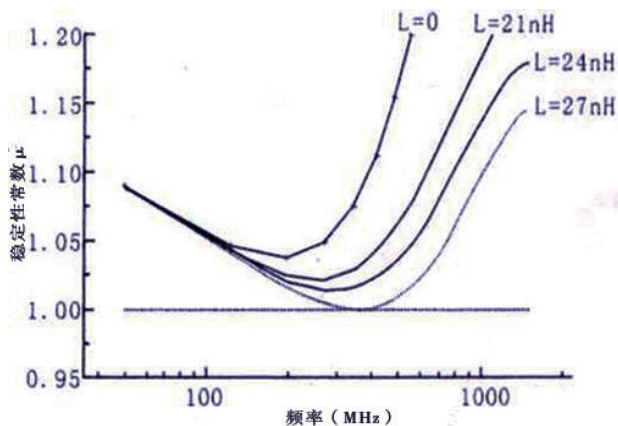


图4 24nH电感器的允许偏差对放大器稳定性的影响

与无24nH电感器时所得到的9.5dB增益相比较，显然，为了满足12dB最小增益要求，需要有一定的电感量。在表2中，对L=24nH预测的标准增益为13.30dB，而且增益随着电感值的增加而增大。然而，如图4所示，最大电感值应限制在27nH，以确保电路稳定工作。Q值方面，尽管随Q值的减小增益有所降低，但其对稳定性的影响大得多，

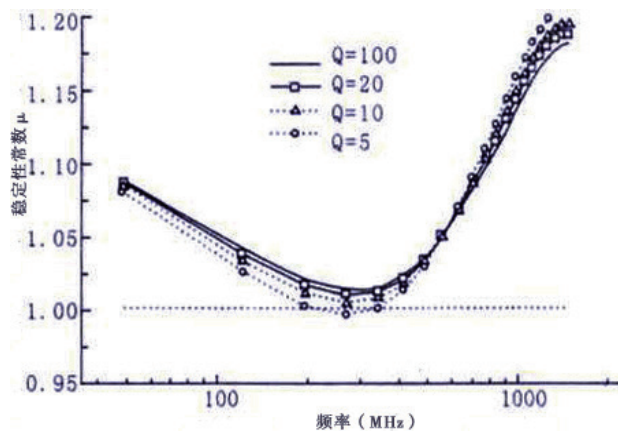


图5 24nH 电感器的 Q 值对放大器稳定性的影响

见图 5 所示。假设在所有情况下都可以达到 12dB 的最低增益要求，那么，这时 24nH 电感器的优良性能对电路的稳定性是至关重要的。

4.2 保证最佳增益和噪声性能的输入 LC 组件

为使电路运行的噪音最低，设计用于低噪声电路中的晶体管，规定了一个源反射系数。采用 NE68719 模块给出的噪声数据，可以计算出图 6 所示的 1.3dB 噪声圈，表明其可以用于提供小于 1.3dB 噪声的阻抗范围。图 6 中还给出了 12dB 和 13dB 的增益圈。使用这种方法可以研究电路增益和噪声性能之间的关系。

在原来的设计中，是选取 $0.38L82.9^\circ$ 的源阻抗作为最小噪声和最大增益之间的折衷值。其在图 6 中以 L_{design} 为标记，图 3 电路的输入端接入 5.1PF 的串联电容器和 8.1nH 的分路电感器就是为了实现这一目的。通过图 6 中的噪声和增益圈，可以看到这一元件的电感值波动及其对有限 Q 值的影响。

其一，首先考虑 $\pm 10\%$ 的电感值允许偏差的阻抗变化：电感值增大时，阻抗从 13dB 圈移动到 12dB 圈；电感值减小时，则增益增大。这与表 2 中用来提供稳定性的输出电感器的趋势相反。然而，如上所述，最大增益还受到电路其它要求的限制。这时，放大器的噪声指数才是最为重要的。如果电感值减小 10%，增益仅增大 0.2dB，而放大器的噪声指数却增大到 1.3dB 以上，这是对放大器规定的最大值，显然，10% 的允许偏差太大了。假设电感器的品质因数 Q 是个理想值，这时为了确保满足噪声指数，需要允许偏差小于 5% 的 8.1nH 电感器。

图 6 也显示出了电感器的 Q 值对电路的影响有限。电

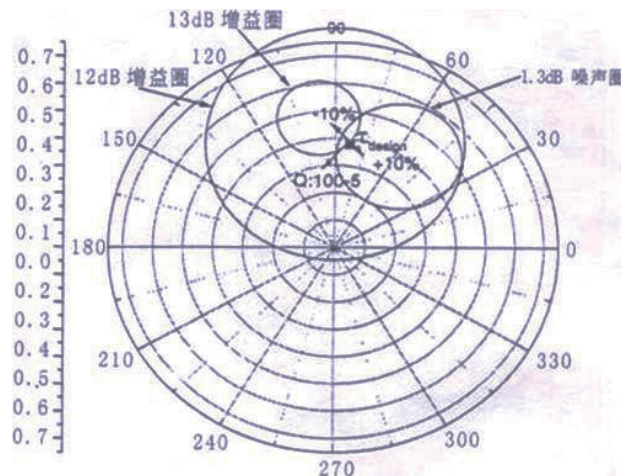


图 6 NE68719 晶体管在 900MHz 下稳定点的增益和噪声圈

路的增益随 Q 值而减小。但在另一方面，对于所有 Q 值，12dB 的最低增益要求是可以保持的。上面已谈到，噪声指数方面也会出现一些问题，在 Q 值下降时，阻抗移出 1.3dB 噪声圈，表示规定的噪声性能不再满足。通过比较并仔细研究可以发现，8.1nH 电感（零允许偏差）为保证噪声不超过 1.3dB，需要 Q 值至少达到 10。对于允许偏差较大的器件，要求 Q 值更大。另外，此时更有效的办法是用更大的电感值，可以采用非零允许偏差和有限的 Q 值。

图 7 所示为 8.12nH 电感器的允许偏差和 Q 值对放大器增益的影响。由图可见，允许偏差引起的电感值变化和 Q 值减小所产生的增益变化都很小。最坏的情况是，电感值下降 10%， $Q=5$ ，电路在 900MHz 下的增益从标称值 13.1dB 下降到 12.9dB。在所有情况下，增益仍保持所需要的 12dB 的最低值，波动小于 0.5dB。因此，这时电路对电感器性能的敏感度取决于噪声。

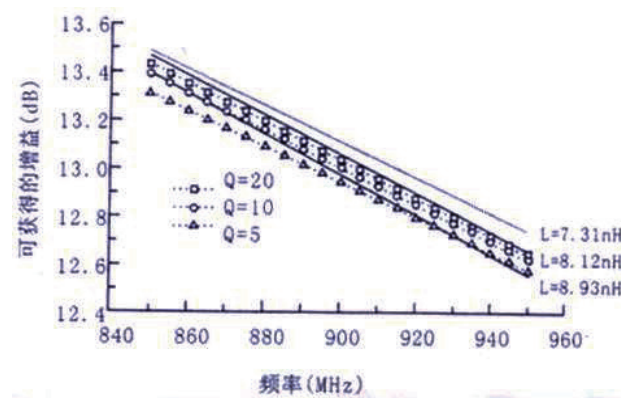


图 7 8.12nH 电感器的允许偏差和 Q 值对放大器增益的影响

4.3 保证最大增益的输出 LCL 组件

增益设计的最后一步是使负载阻抗与放大器输出端口匹配，以使其达到以上预测的 13dB 增益。当接入保证稳定性和低噪声指数所需要的标准元件时，可发现输出反射系数与 $0.39L31.9^\circ$ 负载相匹配。如图 3 所示放大器输出端串联的 $C=1\text{PF}$ 和 $L=22\text{nH}$ 组件，再与另一个 $L=12\text{nH}$ 电感器并联可以达到上述目的。这样的设计，将使放大器的性能比选择等效的二个元件更好。以下，仅介绍电路对其中的一个电感 ($L=22\text{nH}$) 的灵敏度，另两个电感器的作用相同，不赘述。

图 8 所示表明了放大器增益是如何随 $L=22\text{nH}$ 的电感值变化的。从图中可见，电感值增大，低频段增益提高，高频段增益则下降；电感值减小则相反。与图 7 中所示的结果比较，增益变化比对输入电感器要大；电感值变化 10% 时，其增益变化分别为 0.5dB 和 0.2dB。不过，在放大器的整个工作频段内，仍然可满足 12dB 的最低增益和 0.5dB 的增益波动要求的。

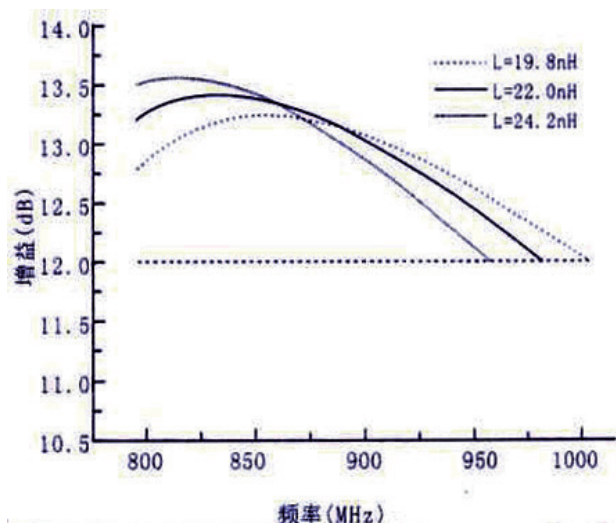


图 8 输出端的 22nH 电感器的允许偏差对放大器增益的影响

图 9 所示为 22nH 电感器的有限 Q 值对放大器增益的影响更大些。最大增益从 $Q=100$ 时的 13.4dB 下降到 $Q=5$ 时的 12.1dB。更重要的是，在大部分工作频段内， $Q < 5$ 时的增益低于要求的最小值 12dB，故这时为了满足最低增益要求，Q 值应大于 10。

对放大器的另外一个技术要求是输入输出反射系数要小于 0.31，其结果以极坐标图的形式显示在图 10 中，图中

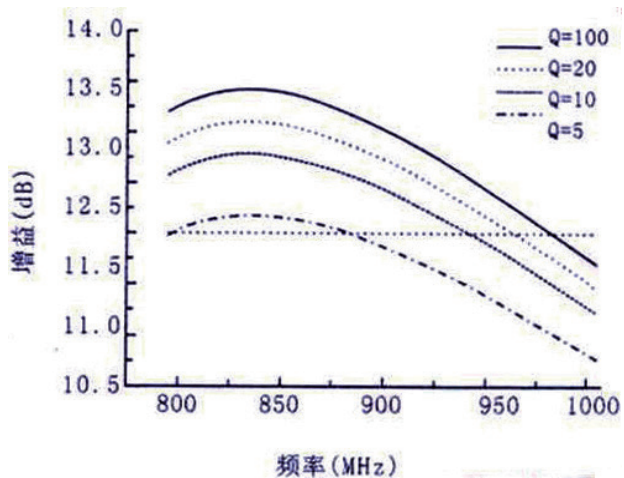


图 9 22nH 电感器的有限 Q 值对放大器增益的影响

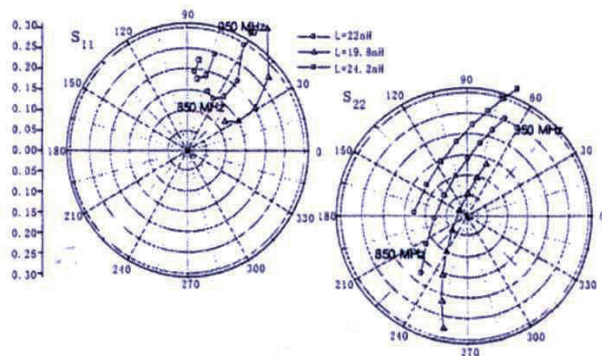


图 10 22nH 电感器的允许偏差对 S_{11} 和 S_{22} 的影响

的 S_{11} 和 S_{22} 表示其与输出电感器的允许偏差是什么样的关系。极坐标图的外半径为 0.31，因此，圆外的点表示反射系数太大。 S_{11} 图表示，电感值减小 10%，高频下变为大于 0.31；电感值增大 10%，则输出反射系数 S_{22} 的结果不变。允许偏差为 5% 时，整个频段内可以达到要求的性能。图中还分析了 Q 值对输入 / 输出反射系数的有限影响，可见在高频下，Q 值对反射系数影响很小甚至完全没有影响；低频下的反射系数则有所改善。

5 用 MCM-L 技术设计射频电感器

以上论述已告诉我们，射频电感器的性能优劣的至关重要的两个参数是电感值允许偏差和 Q 值。在大多数情况下的射频电路应用中，要求电感值允许偏差小于 10%，而同时其 Q 值大于 10。在前面第 2 节中，我们已将一系列的

MCM-L 集成器件的一般性能参数与工业生产制造的片式电感器进行了比较, 其结果表明, 新型集成器件与片式器件的性能参数不相上下。在本节中, 将专门介绍电感值允许偏差和品质因数 Q 值的有关结果, 以说明集成电感器在射频电路中的应用优势。

对于 MCM-L 集成电感器设计、计算机辅助设计以及制作等相关问题已在上面进行了详细阐述, 说明了电感值精度在设计值的 5% 以内、Q 值在 70 ~ 80 的螺旋形绕组是如何制成为电感值为 50 ~ 270nH 电感器的。本节则介绍一系列更适用于射频电路的较小电感值的类似电感器。在此, 重点要关注的是, 设计集成器件的目的是确定限制其尺寸为 $2.5 \times 2.5\text{mm}^2$ 的占空面积内, 集成电感器存在哪些关键因素, 而不是满足特定的电路要求。因此, 给定的参数不是为满足图 3 电路中需要的电感值, 而是用 MCM-L 技术可以达到电感值允许偏差和 Q 值。

由螺旋形绕组电感器的分析模型可以知道, 其电感量因绕组匝数增加而增大。MCM-L 工艺中, 在给定的占空面积上获得最大电感量, 受到印制导体间可达到的最小间距限制。但最小间距从 $50\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 的制作工艺技术是成熟的。假设导体宽度与间距比从 50:50 到 200:200 (μm), 用 MCM-L 技术设计制作 6 种器件。使用图 11 所示的电路模型测试器件性能, 并用 Ausoft Maxwell 软件包在 300MHz 下分析计算图 11 中的 R、L 和 C 参数, 可以发现, 在所有的情况下, 300MHz 时的寄生电容 C 的影响都很小; 最小的共振频率出现在约 3GHz, 因此, Q 值的计算公式可以简化为:

$$Q = \omega L / R \quad (2)$$

由式(2)可见, 调整 L 和 R 参数可以控制 Q 值。另外, 在实践中发现, 用 MCM-L 工艺技术制作电感器的过程中, 必须掌握控制两个技术因素, 才能确保设计的实际器件能在给定的尺寸范围之内, 同时也确保器件设计所要求的 R、L 和 C 值。这两因素的第一个是铜导体深腐蚀的影响: 因为光刻胶层下面的铜导体的过腐蚀, 会减小在叠层板上光刻图中所规定的铜导体宽度。图 12 所示为一种 4 匝绕组电感器的横截面图, 可以用其说明铜导体过腐蚀的影响。光刻图上, 设计规定的铜导体宽度与间距比为 100:100 (μm), 图 12 中所示的导体宽度明显比间距小很多。所以, 通常设计电感器时, 设计规定的导体宽度要比实际需要的大些, 以此来补偿深腐蚀对导体宽度的影响, 形成实际所需的导

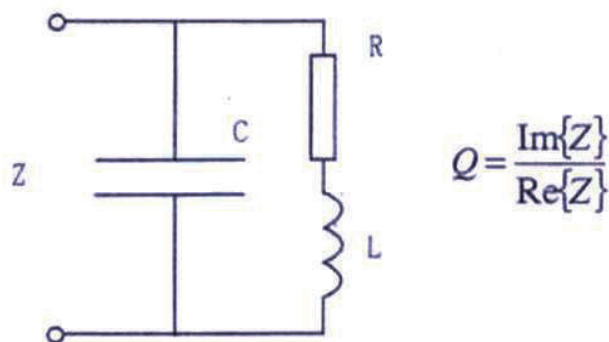


图 11 电感器等效电路



图 12 典型的平面电感器结构横截面图

体宽度。MCM-L 工艺技术中所要控制的第二个因素是铜导体的厚度尺寸。对于图 12 中绕组导体的厚度, 设计规定的尺寸是 $17.5\mu\text{m}$, 但制造中实际达到了 $40\mu\text{m}$ 。其厚度增大的原因是: 制造开始时, 用一层厚为 $17.5\mu\text{m}$ 的铜箔来形成螺旋形绕组, 而为了在基板顶部和底部之间形成连接的通孔, 需要另外采用电镀金属工序, 在通孔连接导体的形成过程中, 同时增大了绕组导体的厚度, 其结果如表 3 和表 4 所列。绕组铜导体的增厚, 客观上提高了电感器的 Q 值, 但电感值的允许偏差也增大了。所以, 为使绕组铜导体掌握在设计要求的厚度, 应在制作开始时就使用较薄的铜导体。

从表 3 和表 4 中, 可见两个工艺技术因素对 MCM-L 技术制成的电感器之性能的影响。对电感器性能的测试是在 100KHz ~ 500MHz 频段, 用 Hp4195 阻抗分析仪进行的: 其一组器件是控制了工艺技术而形成螺旋形绕组, 使光刻图得到了补偿, 用此考察铜导体深腐蚀对导体宽度的影响; 而导体的厚度用较薄的铜箔加以控制。另一组器件的铜导体厚度未经任何控制, 表中也列入, 由此可见工艺技术控制对电感器性能的影响。从表 3 可以看到, 用腐蚀补偿

技术和导体厚度控制工艺制作器件的电感量变化，大多数都比未控制工艺技术参数时制作的小，对每种电感器抽样测试了 10 个样品，其结果表明：对铜导体的深腐补偿效果是明显的，因此，未经补偿的样品之电感值较小，其原因是补偿的样品导体稍微增大了截面积。

表 3 不同工艺对 MCM-L 集成射频电感器的电感量及容差的影响 (@500MHz 以下)

设计编号	未控制工艺	控制工艺	设计值
1	4.5nH ± 14%	4.9nH ± 5%	3.9
2	6.9nH ± 4%	7.2nH ± 3.5%	7.7
3	10.0nH ± 3.5%	10.6nH ± 3%	10.4
4	13.0nH ± 5%	13.5nH ± 3%	14.2
5	22.0nH ± 5%	23.0nH ± 4.5%	22.6
6	27.4nH ± 7%	28.4nH ± 4%	29.0

表 3 中也列入了用有限元分析模型计算的结果，以供比较。显然，控制了工艺条件制作的电感器件测试的结果比未补偿的器件测试结果更接近有限元分析值。有限元分析值通常大于测量值。其差异的原因可以用制作的实际尺寸与设计模型的尺寸之间是存在差异来说明。它们的尺寸差异是由铜导体深腐蚀和过电镀产生的，样品实验可知，其差异就在铜导体截面积的尺寸精度不能保证。存在差异的另一个原因是有限元分析的精度受到限制。采用该软件包二维版本，对外部接点所需的布线影响，分析时没有计算在内。由此也可以说明，为什么设计值是最小的电感器其测试值的偏差反而最大。不过，有限分析可用模拟仿真

提供一种预测电感器尺寸变化引起电感量相应地变化的简便方法。同时，实践证明，比较电感器性能的最好办法是在实际电路中测量其响应时间。

表 4 不同工艺对 MCM-L 集成射频电感器

Q 值的影响 (@500MHz 以下)

设计编号	未控制工艺	控制工艺
1	70-101	71-106
2	71-97	68-82
3	80-101	61-79
4	71-81	67-77
5	68-80	61-72
6	57-68	51-60

工艺技术参数控制对 MCM-L 集成电感器 Q 值的相应影响列于表 4。电感器 Q 值范围的测量也是在 500MHz 频率下进行的。本文指出的 MCM-L 集成电感器的 Q 值的最小测量值为 50。上面章节的分析中已经阐明，对于所有射频电路应用的电感器，其 Q 值大于 20 就足够满足其性能要求。由此可见，经补偿的器件，在电感值允许偏差和 Q 值两个参数上很容易满足图 3 电路应用所要求的技术条件。

表 4 列出的 Q 值结果中，可知未经补偿电感器的测量值通常要大于经补偿的样品。这可以用未补偿线匝导体的厚度较厚而使其截面积增大来解释。所以，MCM-L 集成电感器的 Q 值可以用较厚的铜导来增大，这在设计电感器时就可以解决。

(参考资料略)