

基于 MMIC 工艺的片上射频 LC 无源滤波器*

武 锐 廖小平[†] 张志强

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 设计、制作了几种基于 MMIC 工艺的片上 LC 低通/带通滤波器并进行了测试. 测试结果表明, 一个 3nH 的 MMIC 电感在 6.8GHz 下品质因数达到 13.8, 自谐振频率达到 15.5GHz; 制作的 LC 低通/带通滤波器的截止频率或中心频率与设计偏差很小, 分别为 2% 和 3.3%; 低通滤波器在各自通带内的插入损耗小于 3dB, 带通滤波器在中心频率的插入损耗为 7.2dB.

关键词: LC 无源滤波器; 电感; 电容; MMIC
EEACC: 1350H; 2140; 2560

中图分类号: TN405 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2008)12-2437-06

1 引言

在射频和微波电路中, 滤波器是最常使用的器件之一. 目前这些滤波器都是采用体积较大、价格昂贵的片外分立滤波器实现的, 比如陶瓷滤波器和表面声波 (SAW) 滤波器等. 它们不仅占据很大的空间, 而且消耗较多的功率, 成为系统集成化与小型化的主要瓶颈. 采用片上电感和电容是实现片上滤波器最简单的方法. 近年来, 随着射频集成电路和微电子机械技术 (MEMS) 的快速发展, 已经能够制造出高品质的片上电感和电容^[1,2]. 由它们构成的片上 LC 无源滤波器不仅可以比较精确和方便地调节电路的固有频率, 而且能够极大地提高系统集成度、减少制作成本, 具有重要的研究价值.

目前, 国内外对片上 LC 无源滤波器都有研究. Park 等人^[3]采用表面微机械加工工艺制作了基于高架悬空厚铜 MEMS 电感和 MIM 电容的 LC 滤波器. 清华大学^[4]采用多孔硅牺牲层释放工艺制作了基于悬空 MEMS 电感和 MIM 电容的 LC 低通滤波器, 该滤波器的 -3dB 带宽为 2.639GHz, 在 1GHz 时的插入损耗为 0.177dB. 为了获得高品质的片上电感和电容, 上两例都采用了工艺较为复杂的 MEMS 技术, 虽然能够与传统 IC 工艺兼容, 但却极大地增加了制造成本. 随着半导体技术的不断进步, 射频和微波集成电路的应用频率已经能够达到几个 GHz. 本文研究并制作了几种频率范围在 3GHz 以上的基于 MMIC 工艺的 LC 无源滤波器, 测试结果表明制作的 MMIC 电感的品质因数达到 13.8, 自谐振频率为 15.5GHz; 滤波器的截止频率或中心频率与设计偏差很小, 低通滤波器在各自通带内的插入损耗小于 3dB.

2 制作工艺

本文中的片上 LC 无源滤波器采用两层金属 MMIC 工艺制作, 衬底材料为 GaAs, 构成滤波器的金属材料为金. 以 MMIC 电感为例, 主要的工艺步骤如图 1 所示: (a) GaAs 衬底上溅射金层 (0.3 μ m), 光刻形成电感的下层引线; (b) 生长 SiN 介质层 (0.1 μ m) 并光刻形成连接孔; (c) 淀积聚酰亚胺牺牲层 (1.6 μ m); (c) 电镀金 (2 μ m) 并光刻形成电感线圈.

3 MMIC-LC 无源滤波器的设计

片上 LC 无源滤波器设计的重点和难点是精确获得所需要的 MMIC 电感和 MIM 电容. 射频时片上 MMIC 电感和 MIM 电容的性能不是理想的, 它们不可避免地存在各类寄生效应 (寄生电容和寄生电阻). 虽然通过测试和电磁场软件模拟的方法能够准确地得到片上无源器件的性能, 但是这些方法资源消耗大、设计周期长, 不利于电路模拟和优化. 研究片上电感和电容最常用和最直接的方法是建立和分析它们的等效电路模型.

图 2(a) 是方形 MMIC 平面电感的版图, 其中 d_0 为电感线圈的内径, w 为金属线宽, s 为金属线间距, d_{out} 为电感线圈的外径. 图 2(b) 是 MMIC 平面电感的等效电路模型, 其中由 L_0 , L_1 , R_0 和 R_1 构成的网络表示考虑趋肤效应后电感线圈的电阻和电感^[5], C_s 表示电感线圈内部的边缘电容, C_{is} 表示电感线圈和衬底间的耦合电容; 因为 GaAs 衬底的电阻率非常高, 衬底损耗可以简单地由 C_{is} 和衬底电阻 R_{sub} 的串联电路来表示. 由

* 国家自然科学基金 (批准号: 60676043) 和国家高技术研究发展计划 (2007AA04Z328) 资助项目

[†] 通信作者. Email: xpliao@seu.edu.cn

2008-04-14 收到, 2008-07-24 定稿

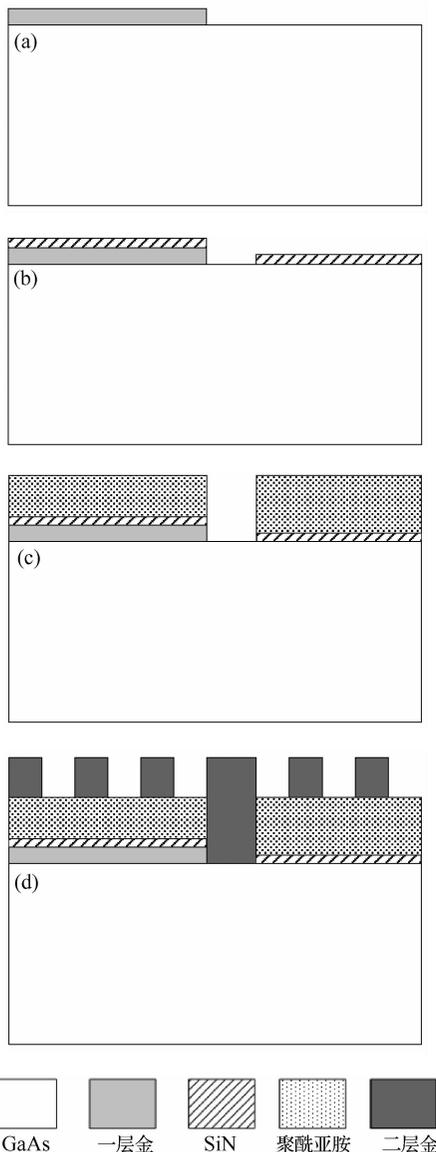


图 1 MMIC 片上平面电感主要的工艺步骤
Fig.1 Main fabrication steps of MMIC inductors

于平面电感形状并不对称,模型中的 C_{is1} 和 C_{is2} , R_{sub1} 和 R_{sub2} 并不相等. 等效电路参数的获取方法有两种,一种是从实际测量结果中提取^[6,7],另外一种方法是基于物理意义的计算^[8,9].

MMIC 电感的电感量可以由 Greenhouse^[10] 算法得到,也可以由 Mohan 提出的 3 种表达式^[11] 计算得到. 当片上电感的工作频率很高时,众多的寄生效应会使电感量明显偏离低频时的电感量. 因此,更为通用的有效电感量由测试的网络参数(Y_{11}) 提取得到:

$$L_{eff} = \text{Im}(-1/Y_{11})/2\pi \cdot f \quad (1)$$

滤波器中的电容采用平行板(MIM)电容,由第二层金-SiN 介质层-第一层金构成. 图 2 是 MIM 电容的等效电路模型^[12],其中 C 表示 MIM 电容的主电容值, L 和 R 表示电容的寄生电感和寄生串联电阻, C_{is} 表示电容与衬底间的寄生电容, R_{sub} 表示电容与衬底间的寄生电阻. 射频时 MIM 电容的有效电容值可以由下式得到:

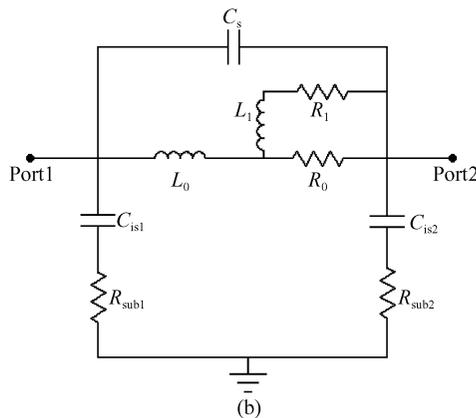
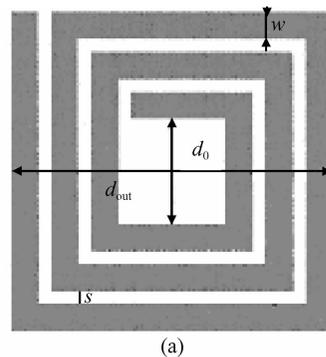


图 2 MMIC 电感的版图(a)和等效电路模型(b)
Fig.2 Layouts (a) and equivalent circuit (b) of MMIC inductors

$$C_{eff} = \frac{1}{2\pi f} \text{Im}(Y_{11}) \quad (2)$$

电感和电容都是储能元件,定义其性能好坏的基本参数是品质因数(Q 值)和自谐振频率. Q 值的定义为电感或电容在一个周期内存储的能量与耗散的能量的比值,由下式得到:

$$Q = -\text{Imag}(Y_{11})/\text{Real}(Y_{11}) \quad (3)$$

自谐振频率(self-resonant frequency)的定义为品质因数为零时的频率,电感和电容的自谐振频率决定了它们所能使用的频率范围.

LC 低通滤波器是滤波器综合设计的基础,带通滤波器的应用最广泛,它们都具有较强的研究意义. 本文按照 LC 滤波器综合设计方法设计了 4 种低通/带通滤波器,主要包含以下步骤:设计具有预期通带特性的低

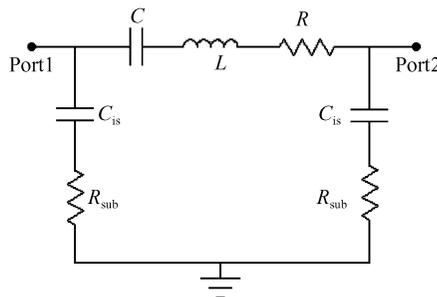


图 3 MIM 电容的等效电路模型
Fig.3 Equivalent circuit of MIM capacitors

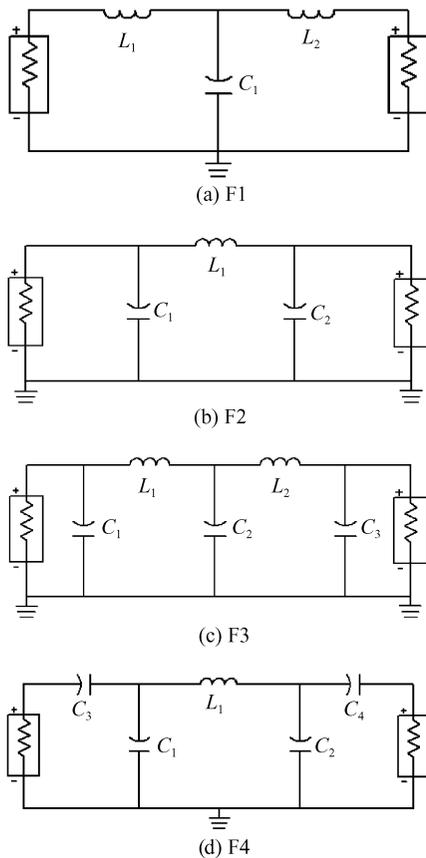


图 4 4 种滤波器的电路结构图
Fig.4 Circuits of four filters

通原型滤波器;根据指定的中心频率或频带边缘频率,将低通原型滤波器转化为所需滤波器类型(低通和带通);用集总形式的电路元件(电感和电容)实现网络(如图 4).4 种滤波器具体的性能参数和仿真结果将在下一部分测试和验证中给出.

表 1 4 种滤波器的集总元件值及版图尺寸

Table 1 Circuit parameters and structural parameters of four filters

滤波器	类型	集总元件值及版图尺寸
F1	电感输入式低通滤波器三阶	$L_1 = 2.65\text{nH}, C_1 = 2.12\text{pF}, L_2 = 2.65\text{nH}$ $L_1 \& L_2$ (layout): $d_0 = 100\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}, s = 10\mu\text{m}, n = 3.5$ C_1 (layout): $W = 58.3\mu\text{m}, L = 58.3\mu\text{m}$
F2	电容输入式低通滤波器三阶	$C_1 = 0.84\text{pF}, L_1 = 2.28\text{nH}, C_2 = 0.84\text{pF}$ L_1 (layout): $d_0 = 80\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}, s = 10\mu\text{m}, n = 3.5$ $C_1 \& C_2$ (layout): $W = 36.4\mu\text{m}, L = 36.4\mu\text{m}$
F3	电容输入式低通滤波器五阶	$C_1 = C_3 = 1.22\text{pF}, L_1 = L_2 = 3.64\text{nH}, C_2 = 2.1\text{pF}$ $L_1 \& L_2$ (layout): $d_0 = 80\mu\text{m}$, $w = 10\mu\text{m}, s = 10\mu\text{m}, n = 4.5$ $C_1 \& C_3$ (layout): $W = 41.5\mu\text{m}, L = 41.5\mu\text{m}$ C_2 (layout): $W = 52\mu\text{m}, L = 52\mu\text{m}$
F4	带通滤波器中心频率 3GHz	$C_1 = C_2 = 2.2\text{pF}, L_1 = 2\text{nH}, C_3 = C_4 = 1\text{pF}$, L_1 (layout): $d_0 = 60\mu\text{m}, w = 10\mu\text{m}$, $s = 10\mu\text{m}, n = 4.5$ $C_1 \& C_2$ (layout): $W = 48\mu\text{m}, L = 100\mu\text{m}$ $C_3 \& C_4$ (layout): $W = 20\mu\text{m}, L = 75\mu\text{m}$

注: n 为电感线圈的圈数, W 表示电容极板的宽度, L 表示极板的长度.

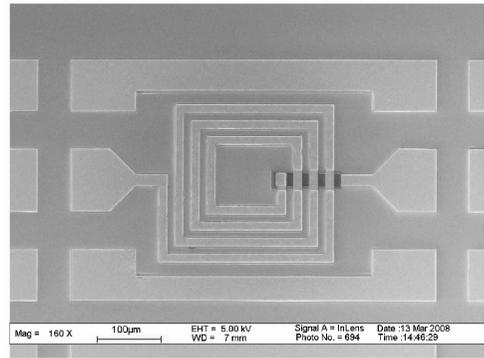


图 5 MMIC 电感的 SEM 照片
Fig.5 SEM photographs of MMIC inductor

表 1 给出了 4 种滤波器的集总元件值及版图尺寸. 需要说明的是, F4 并不是按照滤波器综合设计方法得到的. 在很多时候, 从低通原型滤波器变换到带通滤波器, 不仅需要数量较多的电感, 而且电感的电感量很大, 经常达到几十 nH, 采用片上平面电感难以达到如此高的电感量. 因此, 在一些比较宽松的应用条件下, 可以采用如图 4(d) 所示的拓扑形式简单的带通滤波器. 在 F4 中 C_3 和 C_4 为隔直电容, C_1, C_2 和 L_1 构成一低通滤波器, 它们的级联网络能够实现具有带通特性的滤波器.

4 测试与验证

4.1 电感的测试

MMIC 平面电感的两端口 S 参数由 Agilent HP8510 网络分析仪和 Cascade 共面 GSG 探针台测试得到, 测量范围为 $0.1 \sim 20\text{GHz}$. 一同制作的开路线和短路线用来去除夹具和探针压垫的影响(去嵌入, De-embedding), 利用去嵌入后的 Y 参数由 (1) 和 (3) 式提取有效电感量和品质因数.

以如图 5 所示的一个版图尺寸(内径 $100\mu\text{m}$, 金属线宽 $15\mu\text{m}$, 线间距 $10\mu\text{m}$, 3.5 圈的 MMIC 电感)为例. 图 6 为测试的电感量和品质因数, 其中电感量在 $0.5 \sim 4\text{GHz}$ 内为 3nH , 在 6.8GHz 品质因数达到 13.8, 自谐振频率为 15.5GHz .

4.2 LC 无源滤波器的测试

如图 7~10 所示, LC 无源滤波器采用共面波导 (CPW) 传输线, 在端口处 CPW 的 $G : S : G$ 为 $58\mu\text{m} : 100\mu\text{m} : 58\mu\text{m}$. 将 MIM 电容的上极板或下极板与共面波导地线相连就能实现电容的一端接地. 它们的尺寸依次为: $900\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$, $750\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$, $1000\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$, $700\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$. 滤波器的测试比较简单, 只需要由网络分析仪测试得到 S_{21} 即可. 本节中的测试与第 3 节中所讨论的 4 种 MMIC-LC 滤波器相对应. 为了便于比较, 将 ADS 仿真结果与测试结果一同给出.

图 7 为滤波器 F1 的 SEM 照片和测试结果. F1 为电感输入式三阶巴特沃兹低通滤波器, 截止频率在

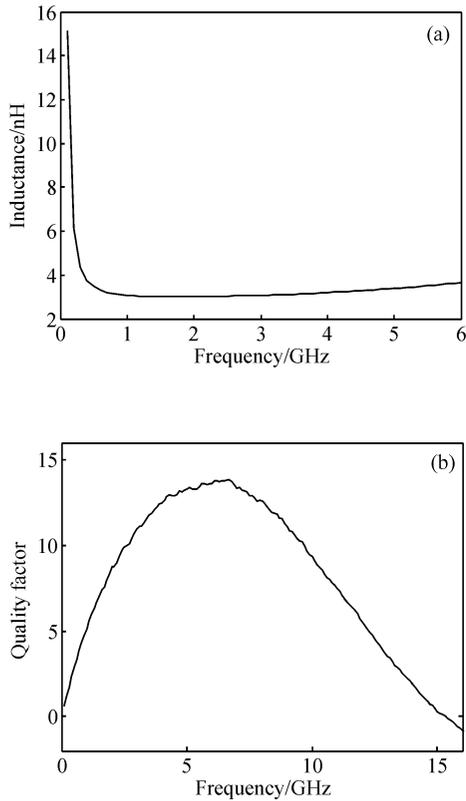


图 6 MMIC 电感(a)和品质因数(b)的测试结果
Fig. 6 Measured inductance (a) and quality factor (b) of MMIC inductor

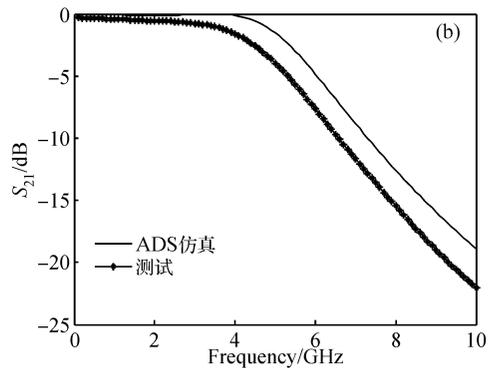
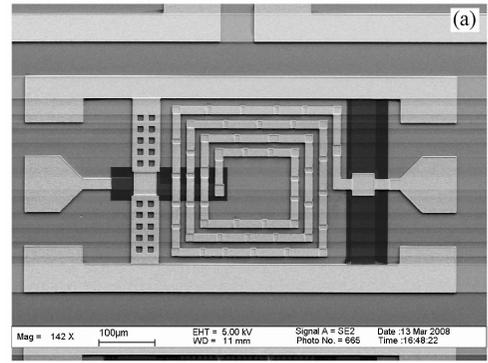


图 8 滤波器 F2 的 SEM 照片(a)和测试结果(b)
Fig. 8 SEM photograph (a) and the measurement result (b) of F2

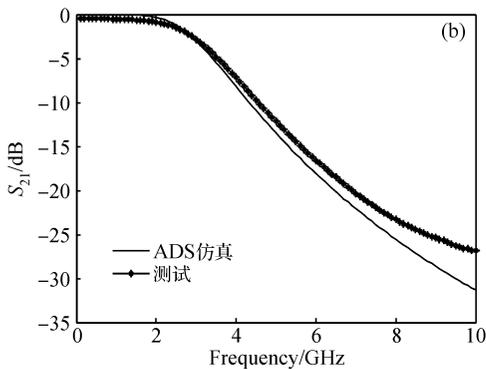
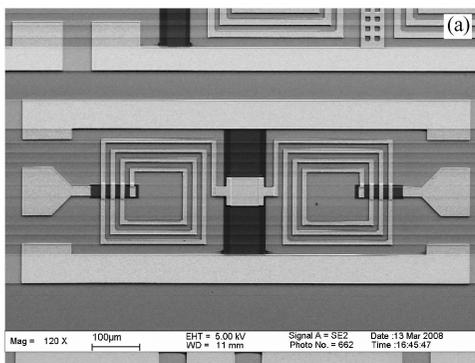


图 7 滤波器 F1 的 SEM 照片(a)和测试结果(b)
Fig. 7 SEM photograph (a) and the measurement result (b) of F1

3GHz. 由图 7 知, 测试得到 F1 的 -3dB 截止频率为 3.05GHz, 非常接近设计指标 ($IL = 3\text{dB}@3\text{GHz}$), 而且在 0~6GHz 内测试曲线与仿真曲线差别比较小.

图 8 为滤波器 F2 的 SEM 照片和测试结果. F2 为电容输入式三阶切比雪夫低通滤波器, 截止频率为 4GHz, 带内衰减小于 0.1dB. 由图 8 知, 测试曲线与 ADS 仿真曲线相比有大约 2.5dB 的插损, 但是在 0~10GHz 内两者的趋势基本一致; F2 在其通带内的波纹不明显, 在 0~4GHz 内插入损耗为 0.28~1.57dB, 它的 -3dB 截止频率约在 4.5GHz.

图 9 为滤波器 F3 的 SEM 照片和测试结果. F3 为电容输入式五阶切比雪夫低通滤波器, 截止频率为 3.5GHz, 带内损耗小于 0.1dB. 由图 9 知, 测试的滤波特性与 ADS 仿真相比在带外抑制度上有明显不足, 这是由于 F3 具有较多的元件, 寄生效应的影响较大造成的; 尽管如此, 因为 F3 的阶数较高, 所以其带外抑制和陡度都好于 F1 和 F2; F3 在 0~3.5GHz 内插入损耗为 0.63~2.42dB, 它的 -3dB 截止频率约为 3.65GHz.

图 10 为滤波器 F4 的 SEM 照片和测试结果. F4 为简单的 π 型拓扑带通滤波器, 中心频率为 3GHz. 由图知, F4 的中心频率约为 3.1GHz, 与设计指标 ($f_0 = 3\text{GHz}$) 的偏差仅为 3.3%, 测试的 -3dB 带宽为 0.55GHz, 滤波器的品质因数为 5.6. 但在 3.1GHz 时 F4 的插入损耗较大, 达到 -7.2dB. 与低通滤波器相比, 带通滤波器 F4 较高的插入损耗是由隔直电容 C_3 和 C_4 引起的.

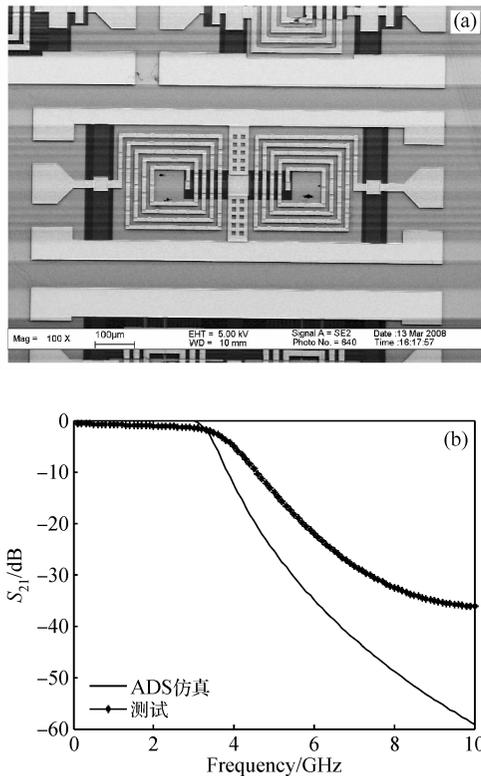


图 9 滤波器 F3 的 SEM 照片(a)和测试结果(b)

Fig. 9 SEM photograph (a) and the measurement result (b) of F3

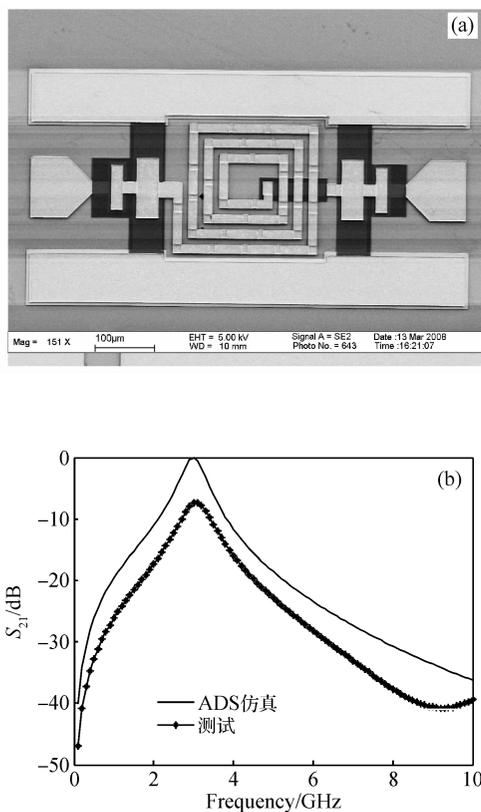


图 10 滤波器 F4 的 SEM 照片(a)和测试结果(b)

Fig. 10 SEM photograph (a) and the measurement result (b) of F4

通过以上的测试和比较发现,制作的 4 种 LC 低通/带通滤波器与设计参数较为一致,插入损耗也在可以接受的范围内.滤波器实际性能与理想滤波特性出现偏差是不可避免的,原因主要有两个:MMIC 电感和 MIM 电容几何尺寸选取不够准确,使电感量与电容值与设计有差别;另一个原因是射频时片上电感和片上电容众多的损耗机制和寄生效应对 LC 滤波器的传输特性产生的影响.从图 2 和图 3 的等效电路模型可以明显地看出,在射频时片上无源器件众多的寄生电容、寄生电感和寄生电阻必然会对 LC 滤波器的传输特性产生显著影响,使射频/微波 LC 无源滤波器的性能参数出现偏差.为了部分抵消寄生效应对滤波特性的影响,在设计时可以在截止频率、带内损耗或带外抑制等参数上适当选取一些设计余量,使片上 LC 无源滤波器的性能达到或接近设计要求.

5 总结

设计、制作了几种基于 MMIC 工艺线的 LC 低通/带通滤波器并进行了测试.测试结果表明,一个 3nH 的 MMIC 电感在 6.8GHz 品质因数达到 13.8,自谐振频率为 15.5GHz;制作的 4 种 LC 低通/带通滤波器的截止频率或中心频率与设计偏差很小,低通滤波器在各自通带内的插入损耗小于 3dB,带通滤波器的插入损耗也在可以接受的范围内.本文所做的设计、制作和测试工作对实现高品质片上 LC 无源滤波器具有一定的指导意义.

参考文献

- [1] Fang Dongming, Wang Xining, Zhou Yong, et al. Fabrication and performance of a micromachined 3-D solenoid inductor. *Microelectronics Journal*, 2006, 37(9): 948
- [2] Han Xiang, Wu Wengang, Li Yi, et al. Electroless copper plating applicable for bulk-silicon micromachined radio frequency inductor. *Thin Solid Films*, 2006; 321
- [3] Park J Y, Allen M G. Packaging-compatible high Q microinductors and microfilters for wireless applications. *IEEE Trans Adv Packag*, 1999, 22(2): 456
- [4] Fang J, Liu Z W, Chen Z M, et al. Realization of an integrated planar LC low-pass filter with modified surface micromachining technology. *IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits*, 2005: 729
- [5] Kim S, Neikirk D P. Compact equivalent circuit model for the skin effect. *IEEE MTT-S Int Microw Symp Dig*, 1996, 3: 1815
- [6] Wang Yanfeng, Huang Qing'an, Liao Xiaoping. Parameters extraction methods of an RF spiral inductor. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(8): 1591 (in Chinese) [王彦丰, 黄庆安, 廖小平. RF 螺旋电感参数的提取方法. *半导体学报*, 2005, 26(8): 1591]
- [7] Kang M, Gil J. A simple parameter extraction method of spiral on-chip inductors. *IEEE Trans Electron Devices*, 2005, 52(9): 1976
- [8] Yue C P, Wong S S. Physical modeling of spiral inductors on silicon. *IEEE Trans Electron Devices*, 2000, 47(3): 560
- [9] Gao Wei, Yu Zhiping. Scalable compact circuit model and synthesis for RF CMOS spiral inductors. *IEEE Trans Microw Theory*

- Tech, 2006, 54(3):1055
- [10] Greenhouse H M. Design of planar rectangular microelectronic inductors. IEEE Trans Parts, Hybrids, Packag, 1974, 10(2):102
- [11] Mohan S S, Hershenson M, Stephen P B, et al. Simple accurate expressions for planar spiral inductances. IEEE J Solid-State Circuits, 1999, 34(10):1419
- [12] Shen Huajun, Chen Yanhu, Yan Beiping, et al. Passive component models for GaAs MMIC. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(10):1872 (in Chinese) [申华军, 陈延湖, 严北平. GaAs MMIC 用无源元件的模型. 半导体学报, 2006, 27(10):1872]

MMIC-Based RF On-Chip LC Passive Filters*

Wu Rui, Liao Xiaoping[†], and Zhang Zhiqiang

(Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The design and fabrication of on-chip LC low/band-pass filters are presented, and the filters are accomplished with MMIC process. Measurement results show that the Q of a 3nH inductor is 13.8 at 6.8GHz and the self-resonant frequency is 15.5GHz. The measured cutoff/center frequencies of low/band-pass filters agree with the design, and the contrast are 2% and 3.3% respectively. The insertion loss of low-pass filters is less than 3dB, and the insertion loss of band-pass filter is 7.2dB at the center frequency.

Key words: LC passive filter; inductor; capacitor; MMIC

EEACC: 1350H; 2140; 2560

Article ID: 0253-4177(2008)12-2437-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.60676043) and the National High Technology Research and Development Program of China (No.2007AA04Z328)

[†] Corresponding author. Email: xpliao@seu.edu.cn

Received 14 April 2008, revised manuscript received 24 July 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics