第 27 卷 第 2 期 半 导 体 学 报 Vol. 27 No. 2
2006 年 2 月 CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS Feb. ,2006

0. 13μm 射频 MOS 场效应晶体管特性及模拟*

池毓宋† 黄风义 吴忠洁 张少勇 孔晓明 王志功

(东南大学无线电工程系 射频与光电集成电路研究所, 南京 210096)

摘要: 采用 0. 13μm CMOS 射频和混合信号工艺进行了射频 nMOS 场效应晶体管版图的优化设计和芯片制作. 对制作的射频 nMOS 器件进行了直流特性和 S 参数测试, 测试结果表明射频 nMOS 管的特征频率 f_T 达到了 93GHz, f_{max}超过了 90GHz. 采用小信号等效电路模型对该 nMOS 管的交流特性进行了模拟. 在 100MHz 到 30GHz 频率范围内得到了与测试结果相吻合的仿真结果.

关键词: CMOS; 射频; 小信号模型; 参数提取

EEACC: 2560S

中图分类号: TN386 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-4177(2006)02-0373-04

1 引言

目前国际上先进的 CMOS 工艺的特征尺寸已经达到了 65nm, MOS 场效应晶体管的特征频率也已经超过了 100GHz[1]. 高性能的 MOS 场效应管在射频和超高速集成电路领域得到了越来越广泛的应用. 国际上已经有采用 0. 13μm CMOS 工艺设计的针对 60GHz 频段应用的超高速电路[2]. 然而, 国内目前已经成熟的 CMOS 工艺仍停留在 0. 18μm CMOS 工艺的水平, 与国际先进的 CMOS 工艺相比有着较大的差距. 同时, 国际上 0. 13μm CMOS 射频和混合信号工艺目前还不十分成熟. 本文将对 0. 13μm 射频和混合信号工艺的射频 MOS 场效应管的特性进行分析和模拟.

本文采用 0. 13μm CMOS 射频和混合信号工艺进行了射频 MOS 场效应管版图的优化设计, 并成功流片. 对所制备的 MOS 场效应管进行了直流特性测试和 S 参数测试. 同时, 使用小信号等效电路模型对射频 MOS 场效应管的交流特性进行了模拟. 在 100MHz 到 30GHz 频率范围内仿真结果与测试结果吻合得很好.

2 版图和制作

为了得到良好的性能, 设计的射频 MOS 场效应管采用了多栅指的双端引出结构. 这种结构不仅可以得到较大的跨导, 而且避免了由于栅宽过大引起多晶硅方块电阻急剧增加的窄线效应[3], 减小了栅极电阻, 栅极与源极、漏极之间的电容. 同时, 为了使 MOS 场效应管具有较好的噪声性能和良好的衬底接地(或接电源), 在晶体管有源区的周围添加了保护环. 设计的射频 MOS 场效应管的版图如图 1(a)所示.

考虑到对晶体管进行 2 端口 S 参数测试, 在设计测试结构时将晶体管的源极与衬底相连接地. S 参数测试的两个端口都采用 GSG 探针, 测试结构中间是信号焊盘, 两边是接地焊盘. 其中, 信号焊盘采用了八边形结构以减小焊盘的寄生电容. 为了使整个测试结构具有一个很好的公共地, 测试结构中的 4 个接地焊盘全部通过宽金属连接在一起. 测试结构版图加上 MOS 场效应管的版图就构成整个被测器件的版图. 图 1(b)是通过 0. 13μm CMOS 射频和混合信号工艺流片得到的被测器件的芯片照片.

3 器件测试

3.1 直流特性测试

首先对所制备的射频 MOS 场效应管进行了直流特性测试. 栅指数为 16、栅宽为 5μm、栅长为 0. 13μm nMOS 场效应管的输出特性曲线(I_d-V_d)的一组测试结果如图 2 所示. 图 2 中曲线自上到下对应的 V_g 分别为 1. 2, 1. 0, 0. 8, 0. 6 和 0. 4V.

* 国家自然科学基金(批准号: 60476012), 江苏省自然科学基金(批准号: BK2004066), 东南大学科学基金(批准号: XJ0404142)资助项目

† 通信作者. Email: yschi@seu.edu.cn

2005-11-21 收到

c 2006 中国电子学会

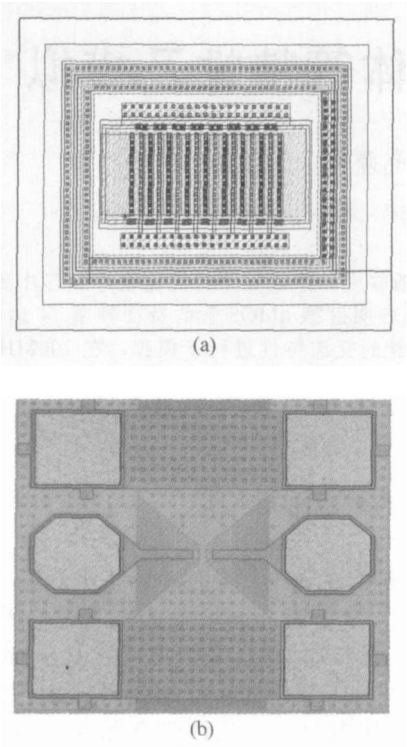

图 1 0.13μm CMOS 工艺 MOS 场效应管的版图(a)和被测器件的芯片照片(b)

Fig. 1 Layout of a MOS transistor in 0.13μm CMOS technology (a) and photograph of DUT (b)

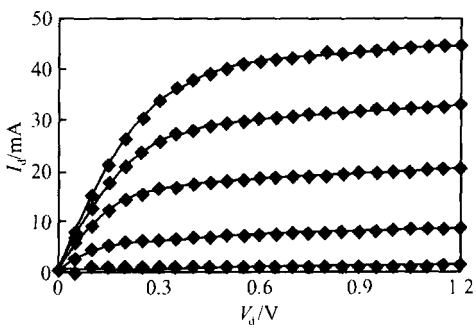

图 2 栅指数 n = 16, W = 5μm, L = 0.13μm 的 nMOS 场效应管的 I_d-V_d 特性

Fig. 2 I_d-V_d characteristic of a 16-finger nMOS transistor with W = 5μm, L = 0.13μm per finger

3.2 S 参数测试

使用 E8363B 高性能网络分析仪对被测器件进行了 S 参数测试,测试的频率范围从 100MHz 到 30GHz. 同时还对用于去外嵌(de-embeding)的开路(open)和短路(short)结构进行了测试. 在得到这些测试数据后,采用开路-短路方法进行了数据的去外嵌处理,最后得到了射频 MOS 场效应管的测试数据.

根据测得的 S 参数计算得到的电流增益和梅森(Mason)单位增益随频率变化的特性曲线如图 3 所示. 从图 3 可以看出,电流增益具有很好的线性关系,通过其与 x 轴的交点可以估算出 MOS 管在该偏置条件下的特征频率. 而梅森单位增益在高频时同样具有较好的线性关系. 估算得到的 MOS 管的特征频率和最高谐振频率分别达到了 93 和 91GHz.

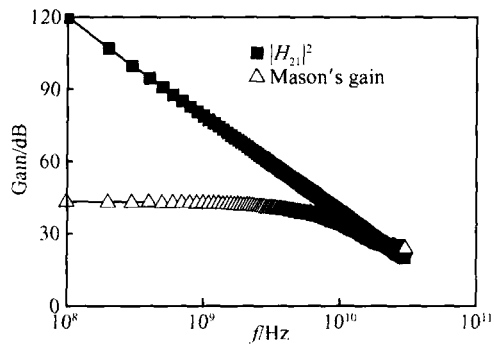

图 3 $|H_{21}|^2$ 和梅森单位增益随频率变化特性曲线

Fig. 3 Frequency dependencies of $|H_{21}|^2$ and Mason's gain

4 小信号模型和参数提取

射频 MOS 场效应管的小信号模型如图 4 所示[4]. 可以将小信号模型分为两部分,电阻 R_g, R_s, R_d 是外围的寄生电阻,而剩余的其他元件均可归为模型的本征部分. 本征部分的 R_{gs}, R_{gd} 和 τ_g 是为了模拟非准静态效应. 而 R_{db} 和 C_{db} 则用来模拟衬底效应.

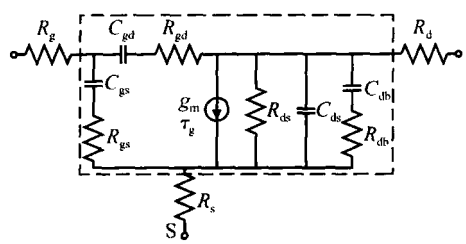

图 4 射频 MOS 场效应管小信号模型等效电路

Fig. 4 Small signal equivalent circuit model for RF MOSFET

为了对图 4 所示的小信号模型进行参数提取,首先将测试得到的 S 参数转换为 Z 参数. 接着,采用了 Torres 提出的方法得到 R_g[5],通过文献[4]的方法得到 R_s, R_d. 在 R_g, R_s, R_d 确定后,通过 Z 参数到 Y 参数的转换得到不包含这三个电阻的小信号模型本征部分(图 4 中虚线框部分)的 Y 参数. 模型本征部分的参数主要采用了文献[4]中的方法进

行提取. 其中, g_{ds} 参数值的提取通过低频时 Y_{22} 实部对 ω^3 函数在 y 轴的截距来确定. 而对于 C_{gs}, C_{gd} 的参数值, 则采用公式 $C_{gs} = \mathrm{Imag}(Y_{11} + Y_{12})/\omega$, $C_{gd} = \mathrm{Imag}(-Y_{12})/\omega$ 进行确定(这里的 Y 参数是指小信号模型本征部分的 Y 参数). 表 1 给出了不同尺寸的 nMOS 管在 $V_g = 1.0V$, $V_d = 1.2V$ 偏置下的小信号模型的参数值. 图 5 给出了小信号模型的仿真结果与测试数据. 从图 5 中可以看出, 仿真结果以测试数据吻合得很好.

表 1　不同尺寸 nMOS 管的小信号模型的参数值列表

Table 1　Small signal model parameter list for different size of nMOS

管子尺寸 n ×W ×L	R_g /Ω	R_s /Ω	R_d /Ω	C_{gs} /fF	R_{gs} /Ω	C_{gd} /fF	R_{gd} /Ω	R_{db} /Ω	C_{db} /fF	R_{ds} /Ω	C_{ds} /fF	g_m /mS	τ_g /ps
16 ×8 ×0.13	3.3	1.8	2.4	140	3.65	53	13.7	116	363	96	74	138	0.86
16 ×5 ×0.13	3.4	2.9	3.8	90	4.38	34	14.5	181	173	156	47	87	1.39
16 ×2 ×0.13	5.0	7.5	9.7	39	7.36	15	15.2	426	38.5	389	21	35	2.25
16 ×1 ×0.13	11.5	15	21	23	19.5	9.2	21.2	853	12.1	802	11	17	2.45

注: 偏置 $V_g = 1V$, $V_d = 1.2V$

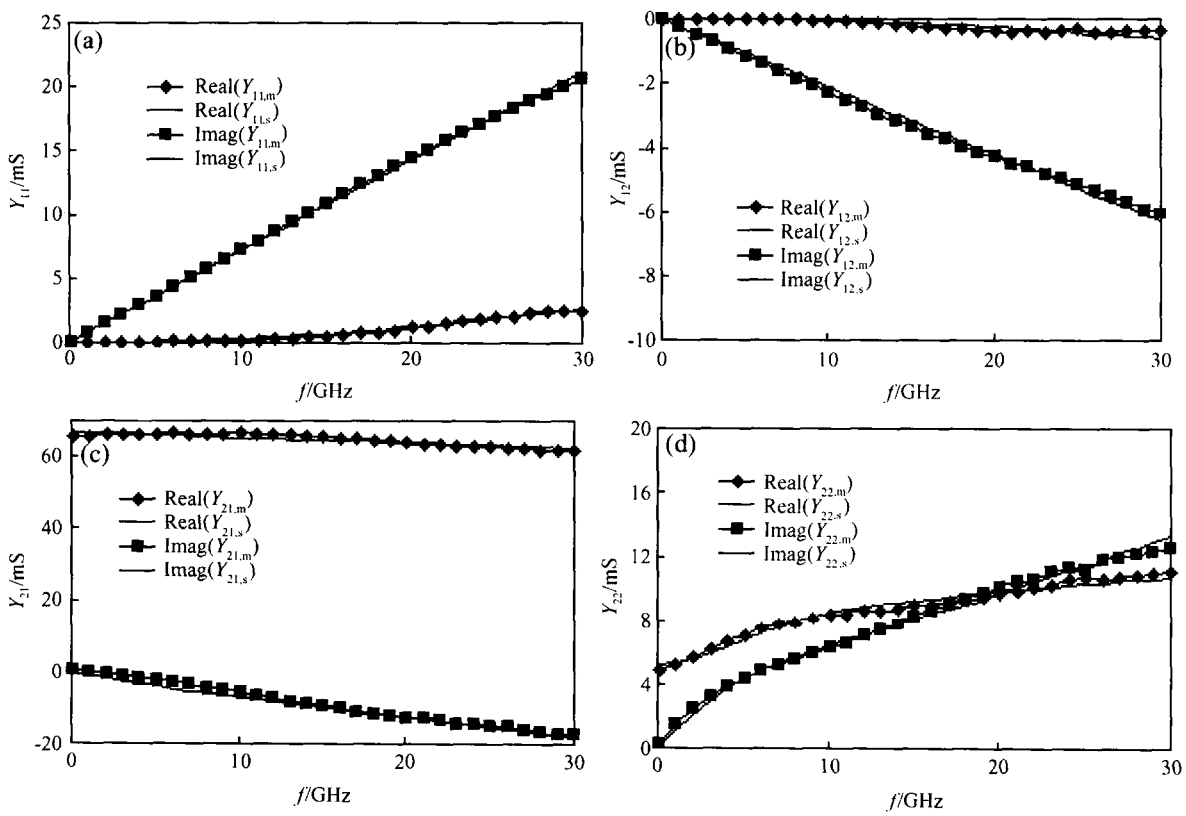

图 5　栅指数为 n = 16, W = 5μm, L = 0.13μm 的 nMOS 在 $V_g = 1.2V$, $V_d = 0.8V$ 偏压下 Y 参数的仿真结果和测试数据的比较 (a) Y_{11}; (b) Y_{12}; (c) Y_{21}; (d) Y_{22}

Fig. 5　Comparison between modeled and measured Y-parameters of a 16-finger nMOS with W = 5μm, L = 0.13μm per finger at $V_g = 1.2V$, $V_d = 0.8V$　(a) Y_{11}; (b) Y_{12}; (c) Y_{21}; (d) Y_{22}

5　结论

成功地进行了代表目前国内最高工艺水平的 0.13μm CMOS 射频和混合信号工艺 nMOS 场效应管的版图设计和流片, 并进行了直流特性测试和 S 参数测试. 测试结果表明, 设计的射频 nMOS 场效应管特征频率 f_T 达到了 93GHz, f_{max} 超过了 90GHz. 同时使用小信号等效电路对射频 MOS 场效应管进行了模拟. 在 100MHz 到 30GHz 的频率范围内, 仿真结果与测试数据吻合得很好.

致谢 感谢熊明珍老师和章丽老师在器件测试和流片中给与的支持.

参考文献

[1] Yang M T, Ho P P C, Wang Y J, et al. Broadband small-signal model and parameter extraction for deep sub-micron MOSFETs valid up to 110GHz. IEEE Radio Frequency Integrate Circuits Symposium, 2003, TU4B-4:369

[2] Doan C H, Emami S, Niknejad A M, et al. Design of CMOS for 60GHz applications. IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2004, 1:440

[3] Enz C. An MOS transistor model for RF IC design valid in all regions of operation. IEEE TMTT, 2002, 50(1):342

[4] Voinigescu S P, Tazlauanu M, Ho P C, et al. Direct extraction methodology for geometry-scalable RF-CMOS models. Proc IEEE Int Conference on Microelectronic Test Structures, 2004, 17:235

[5] Torres-Torres R, Murphy-Arteaga R S, Decoutere S. MOSFET gate resistance determination. Electron Lett, 2003, 39(2):248

Characterization and Modeling for 0.13μm RF MOSFETs*

Chi Yusong†, Huang Fengyi, Wu Zhongjie, Zhang Shaoyong, Kong Xiaoming, and Wang Zhigong

(Institute of RF & OE IC's, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: RF nMOS transistors with optimized layouts are successfully fabricated in a 0.13μm CMOS RF/MS technology. DC characteristic and S-parameter measurements are performed. The measured results show that the cut-off frequency and the maximum oscillation frequency of the RF nMOS reach beyond 93 and 90GHz, respectively. Small-signal modeling is carried out for these RF MOSFETs using a small-signal equivalent circuit model. The simulation results fit well with the measurement results in frequency range from 100MHz to 30GHz.

Key words: CMOS; RF; small signal model; parameter extraction

EEACC: 2560S

Article ID: 0253-4177(2006)02-0373-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60476012) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2004066)

† Corresponding author. Email: yschi@seu.edu.cn

Received 21 November 2005

c 2006 Chinese Institute of Electronics