

基于 BSIM3 的低温 MOSFET 模型及参数提取

邓旭光

(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:器件模型作为工艺与设计之间的接口,对保证集成电路设计成功具有决定意义。本文介绍了 BSIM3 模型的原理,并完成了低温下(77K)BSIM3 模型的参数提取。同时探讨了使用参数提取软件的具体工作步骤。

关键词:MOSFET;BSIM3;参数提取

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.20

Low temperature MOSFET model and parameter extraction based on BSIM3

DENG Xu-guang

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Device model as interface between IC process and design are very important for ensuring a successful IC design. The theory of BSIM3 is presented, and model parameters under low temperature (77K) are extracted. Meanwhile, the details of parameter extraction software are introduced and discussed.

Key words: MOSFET;BSIM3;parameter extraction

1 引言

低温(77K)MOSFET 参数提取工作主要是配合红外读出电路的设计而展开的,红外探测器工作在低温(77K)环境下,与之相耦合的硅读出电路也要工作在相同的低温(77K)环境下。晶圆代工厂只提供常温下的 MOSFET 模型及参数,不可能完全吻合低温(77K)下器件的真实工作特性,所以我们开展了这项工作,以期在与代工厂的长期合作中,研制出适合自身要求的读出电路。

器件模型作为工艺与设计之间的接口,用于大规模集成电路的设计和仿真,本文以低温(77K)环境为前提,选定的晶圆代工厂工艺设计测试结构,对测试结构进行 IV、CV 测试,最终使用软件将测试数据提取为模型参数。

2 BSIM3 模型原理

BSIM 模型是由加利福尼亚大学伯克利分校开发研制的,它是第一款用于 SPICE 模拟的工业标准 MOS 模型。

MOSFET 的 BSIM 模型中,BSIM1 模型是一个为 $1\ \mu\text{m}$ MOSFET 技术而发展的模型,包含很多对短沟道效应的更好理解,对沟道长度大于或等于 $1\ \mu\text{m}$ 的器件的模拟结果非常准确。尽管 BSIM1 模型为每个模型参数引进了几个适应参数来提高模型的尺寸覆盖性,但 BSIM1 模型还是不能完全让人满意。

BSIM2 模型以 BSIM1 模型为基础在很多方面进行了改进,如模型的连续性、输出电导、亚阈值电流等。但是,BSIM2 模型仍然不能用一组参数来模拟大尺寸范围的器件。为了在所有器件尺寸范围内获得准确的模拟结果,用户通常都需要提取几组甚至很多组模型参数,每一组模型参数覆盖器件几何尺寸的一个有限范围。而且,用这些参数进行静态模拟和把这些参数从现在的技术外推到以后的技术都非常困难。

作者简介:邓旭光(1975 -),主要从事红外读出电路的设计研制工作。E-mail:dengxg666@hotmail.com

收稿日期:2013-06-19;**修订日期:**2013-07-04

BSIM1 模型和 BSIM2 模型集中于解决模型的精度并考虑公式的简化,因而引入了大量的经验参数或弥合参数来提高模型精度,虽可以自动提取参数,但实际应用中存在模型参数过多和冗余问题。BSIM3 则不同,它是基于准二维分析的物理模型,着重于器件工作的物理机制,并考虑了器件尺寸和工艺参数的影响,力求使每个参数与器件特性的关系可以预测,为方便参数提取,还尽可能设法减少了模型参数的个数。

几种 MOS 模型的比较如表 1 所示。

表 1 几个 MOS 模型的比较

模型名称	最小沟道长度 L / μm	最小栅氧厚度 T_{ox} / μm	强反型区 I_d 准确度	亚阈值区 I_d 准确度	小信号参数
BSIM1	0.8	15	一般	好	好
BSIM2	0.35	7.5	一般	好	好
BSIM3v2	0.25	4	一般	好	好
BSIM3v3	0.15	<3	好	好	好

BSIM3 模型中主要考虑了以下效应:

- (1) 短沟和窄沟对阈值电压的影响;
- (2) 横向和纵向的非均匀掺杂;
- (3) 垂直场引起的载流子迁移率下降;
- (4) 体效应;
- (5) 载流子速度饱和效应;
- (6) 漏感应引起的势垒下降(DIBL 效应);
- (7) 沟道长度调制效应(CLM 效应);
- (8) 衬底电流引起的体效应(SCBE 效应);
- (9) 次开启(亚阈值)导电问题;
- (10) 漏/源寄生电阻。

目前 BSIM3 模型已有 3 个版本,不同版本之间某些模型参数有一定差别,而且参数的定义也可能不一致,这就要求参数提取中提取的所有模型参数要针对同一版本。表 2 以第三版本罗列了部分 BSIM3 的模型参数。

3 测试图形设计

按照提取软件手册介绍,理想情况下提取器件模型参数,至少需要 11 种尺寸的器件,这样提取出的参数既能反映出短沟效应对器件性能的影响,又能反映出窄沟效应对器件的性能的影响。特殊情况下,器件的尺寸分布无法严格满足上述要求时,至少也需要 4 种尺寸的器件,只是这样提取出的模型参数比较粗糙而已。如图 1 所示。

表 2 BSIM3 部分模型参数

参数名	意义	缺省值 (NMOS/PMOS)	单位
模型选择及可定义参数			
Level	模型级别	1	—
Mobmod	迁移率模型选择标志符	1	—
CapMod	电容模型选择标志符	0	—
SatMod	饱和模型选择标志符	2	—
SubthMod	亚阈值模型选择标志符	2	—
BulkMod	衬底电荷模型选择标志符	1	—
Xpart	电荷分配标志符	0	—
Delta			
Tref(Tnom)	参数提取时的温度	25	$^{\circ}\text{C}$
工艺参数			
Nsub	衬底掺杂浓度	$6.0\text{E}16$	cm^{-3}
Nch	表面峰值掺杂浓度	$1.7\text{E}17$	cm^{-3}
Ngat	多晶硅栅掺杂浓度	0	cm^{-3}
Tox	栅氧化层厚度	$1.5\text{E}-8$	m
Xj	结深	$0.15\text{E}-6$	m
dl	沟长单边缩减尺寸	0.0	m
dw	沟宽单边缩减尺寸	0.0	m
阈值电压参数			
Vth0	长沟器件($V_{\text{Bs}}=0$, 低 D_{DS})阈值电压	0.7	V
Phi	强反型时的表面势		V
K1	一阶体效应系数	0.50	$\text{V}^{1/2}$
K2	二阶体效应系数	-0.0186	—
K3	窄宽度效应系数	80.8	—
Dvt0	短沟时窄沟效应的第一系数	0	1/m
Dvt1	短沟时窄沟效应的第二系数	$5.3\text{E}6$	1/m
Dvt2	短沟时窄沟效应的体效应系数	-0.032	1/V

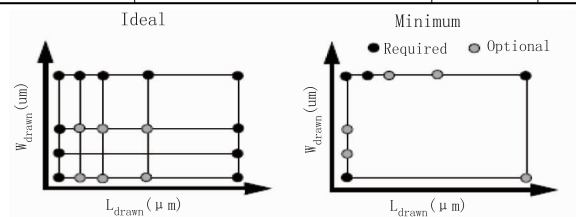


图 1 MOS 器件尺寸理想数量与最小数量要求

待测器件的尺寸满足以下要求:①宽沟道 W 一定,沟道长度 L 变化;②短沟道 L 一定,沟道宽度 W 变化;③长沟道 L 一定,沟道宽度 W 变化;④对于给定的沟长 L ,要有不同的 W 。

根据上述原则,设计出的器件版图如图 2 ~ 图 5

所示。

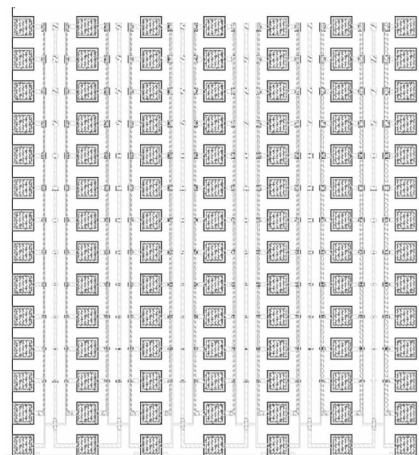


图2 NMOS IV 测试阵列

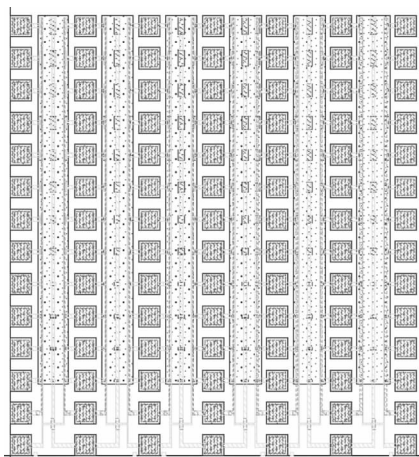


图3 PMOS IV 测试阵列

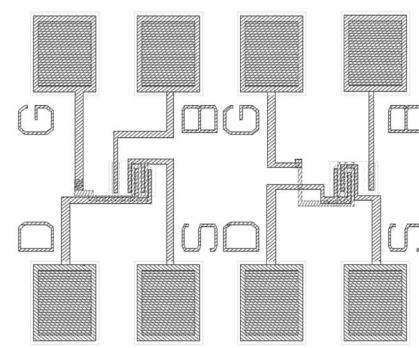


图4 CV 测试阵列

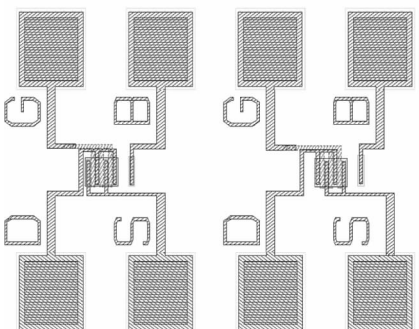


图5 噪声测试阵列

4 实验

MOSFET 参数提取,主要是通过对 MOS 器件的 I-V 参数、C-V 参数、噪声参数的测量,根据业界已公认的半导体器件模型(如 BSIM1、BSIM2、BSIM3 模型)提取相应的器件参数。针对我们的应用要求,参数提取系统的硬件构成如图 6 所示。

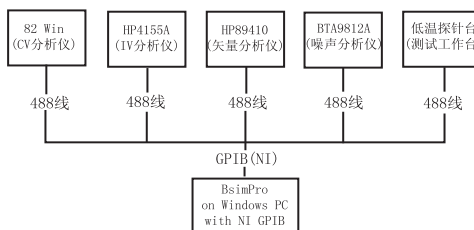


图6 半导体参数提取系统硬件构成

将实验样品放入低温探针台样品架上,使用液氮进行制冷,在经过一段时间,温度稳定后,连接测试设备进行测试。

4.1 I-V 特性的测量及提取

相对而言,IV 特性的测量要简单一些,其测量原理如图 7 所示,器件数据和提取结果如图 8 所示。

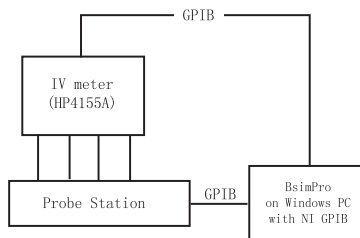


图7 IV 测试原理

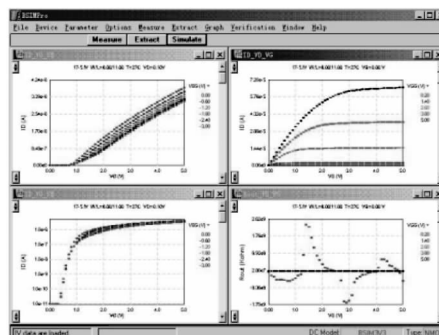
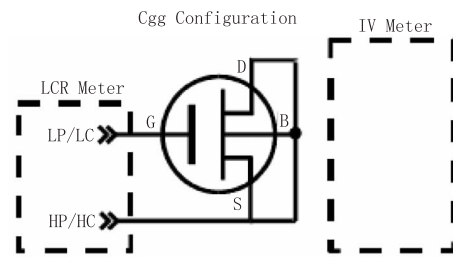
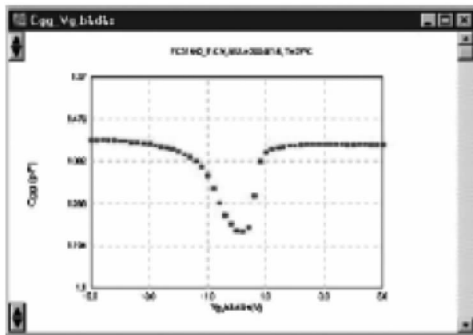


图8 提取结果

4.2 C-V 特性的测量及提取

CV 特性的测量相对要复杂一些,包括以下几种电容的测量:栅衬电容 C_{gb} 、栅沟电容 C_{gc} 、栅漏电容 C_{gd} 、栅源电容 C_{gs} 、栅电容 C_{gg} 、结电容 C_{jc} 。每种电容的测量方法不同,我们仅以 C_{gg} 为例说明实验方法,CV 器件连接方法和提取结果如图 9、图 10 所示。

图9 C_{gg} 测试设备连接图10 C_{gg} 提取结果

5 结论

按照上面的步骤,可以得到一套低温下 MOSFET BSIM3 的参数。使用这套参数对读出电路进行仿真,并且与读出电路的实测结果相对比,来验证这套参数的准确性,根据两者之间的差异来调整这套参数的提取策略和优化方法。

参考文献:

- [1] 顾祖毅,田立林,等. 半导体物理学[M]. 北京:电子工业出版社,1995.
- [2] BTA Technology Inc. Bsimpro User's Manual[M]. 1977.
- [3] Cheng Yuhua, Hu Chenming. MOSFET modeling and BSIM3 user's guide[M]. 1999.
- [4] Chen Songtao, Liu Xiaoyan, Du Gang, et al. Ultra deep submicron device modeling and the model parameter extraction based upon the BSIM3[J]. Research & Progress of SSE, 2003, 23(4): 406-411. (in Chinese)
陈松涛,刘晓彦,杜刚,等. 基于 BSIM3 的超深亚微米器件建模及模型参数提取[J]. 固体电子学研究与进展, 2003, 23(4): 406-411.
- [5] Li Qinghua, Han Zhengsheng, Hai Chaohe. MOSFET models and parameter extraction [J]. Microelectronic Technology, 2003, 31(4): 23-28, 38. (in Chinese)
李庆华,韩郑生,海潮和. MOSFET 模型 & 参数提取 [J]. 微电子技术, 2003, 31(4): 23-28, 38.
- [6] Liu Wenyong, Feng Qi, Ding Ruijun. Impact of Kink effect on CMOS readout circuits for cryogenic operation[J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (Supplement): 990-992. (in Chinese)
刘文永,冯琪,丁瑞军. Kink 效应对低温 CMOS 读出电路的影响 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (增刊): 990-992.