

# 半导体器件与工艺综合

鲁 勇 谢晓锋 张文俊 杨之廉

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

**摘要:** 利用器件与工艺综合的思想, 开发出自顶向下的新的器件和工艺设计方法, 实现了该设计方法的 MOSPAD 软件, 并利用 MOSPAD 系统做出了一定的综合结果. 做出了关于器件与工艺综合的两个实例, 即对 FIB 器件的器件综合和对阱形成工艺模块进行的工艺综合, 并证明了自顶向下的器件与工艺综合思想的可行性.

**关键词:** 综合; 器件综合; 工艺综合; MOSPAD; FIB

**EEACC:** B2570A; C1180; C7410D

**中图分类号:** TN405

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2002)07-0772-05

## 1 简介

综合技术作为一项重要技术, 在半导体集成电路的研究中已有很广泛的应用. 但目前综合技术主要是应用于电路设计中, 电路的综合已经是一项很成熟的技术, 从行为级到电路级再到版图级, 通过层层综合, 可以得到所需的集成电路设计. 与之相对应的是, 在器件与工艺的研究中, 也有同样类似的综合技术<sup>1</sup>. 设计者可以根据所需的器件电学特性, 通过综合的方法, 得到器件的尺寸等物理信息. 再进一步, 根据所得到的器件物理特性, 更可通过综合的方法得到工艺流程中各部分的参数.

利用这种自顶向下的设计思想, 将给新器件研究和生产带来革命性的改变. 过去的器件设计是在全手工的前提下, 逐步修改器件参数或工艺条件, 以满足自己所需要的器件特性. 这里, 所需的人工经验非常重要, 同时无法提高效率. 而采用新的设计思想, 不仅可以使器件的研究规范化, 还可以利用计算机辅助设计, 降低人力资源的消耗, 缩短产品的开发周期.

作为一种新的设计思想, 目前国内外尚未出现

成熟的设计工具, 只有部分实验室开发的实验系统可完成器件综合或工艺综合中部分功能. 早期的 DOE/Opt<sup>2</sup> 系统引入了一些参数优化的概念, Saxena<sup>3</sup> 等根据工艺综合的思想做出一些器件与工艺综合的结果, Vista<sup>4</sup> 系统实现了一些参数优化的工作.

## 2 器件综合

器件综合是指根据半导体器件电学特性通过综合的方法, 得到所需器件的设计参数, 包括物理尺寸、掺杂浓度等, 例如电学特性包括驱动电流  $I_{on}$ 、关断电流  $I_{off}$  以及输出电阻  $R_{out}$  等. 而设计参数包括沟长、源漏浓度、衬底浓度、栅氧厚度等.

通常, 为了获取适当的电学特性, 设计者手工调整各种设计参数, 再通过模拟软件进行模拟, 得到的模拟结果通常来说不能很好地符合设计者的要求. 设计者需根据自己的经验, 调整参数, 重新模拟, 如此反复. 而在综合的方法学里, 采用的是自顶向下的设计思想. 设计者首先提出的是所需半导体器件的电学特性, 而对所需综合的器件设计参数只需要大致的了解, 给出一定的允许空间, 即允许的参数范围. 然后通过综合的方法, 可以得到所需的器件设计

参数.

从一般意义上说,综合是模拟的反向过程.而综合作为模拟的反向过程,是建立在模拟软件的基础之上.模拟是半导体集成电路领域非常普遍地方法,包括电路模拟、器件模拟以及工艺模拟.模拟软件是通过很多的模型来支持的,包括各种解析的或数值的模型<sup>5</sup>.但通常这些模型的反向函数是很难得到或根本无法得到的,同时其反向物理过程也是无法分析的.而综合相当于根据模拟的结果得到其输入参数,因此,在综合的过程中,如何建立合适的反向模型是非常困难的,通常采用的是—些数学手段.

综合的另一个问题是得到的结果是一个设计空间,而非单一的结果,这点与模拟也是完全不同的.这样如何得到完整的设计空间以及如何挑选合适的结果也是需要研究的难点.

### 3 工艺综合

与器件综合类似,工艺综合是工艺模拟的反向过程.工艺综合的输入参数是工艺流程各模块的目标,而输出综合结果则是工艺流程中不同模块的工艺条件.例如,输入参数中源漏浓度、结深,输出工艺流程中源漏注入时的能量、剂量、扩散时间、温度等.

在工艺流程中,工艺步骤数量很多,通常无法—次综合出所有步骤的工艺条件.为了解决这个困难,需要将整个工艺流程划分成多个工艺模块,各模块之间相对独立,各模块都有自己的综合目标.因此,整个工艺流程的综合简化为各模块内部的综合,同时根据—定的综合顺序,即可得出整个工艺流程的参数.这种方法与常用的参数提取中的局部优化有类似的地方.

工艺流程中,有很多时候需要在高温下操作,而高温操作将使不同工艺步骤间有着—定的温度效应的影响,在工艺界称之为热效应预算(thermal budget)<sup>6,7</sup>.所以在工艺综合的过程中,需要考虑热预算的存在.为了解决这个问题,首先在划分工艺模块的时候—应该把功能相近的工艺步骤分在—起,还应该考虑到温度效应,使得各模块之间的温度影响较小.这种思路的可行性在于通常的工艺流程设计中,指导思想是希望后续工艺步骤对前面工艺步骤的影响最小.而对于其它—些影响较大而不可忽略的高温步骤,如 RTA,应该考虑作为逻辑上的工艺模块,放在各实际工艺模块中,在综合低温工艺模块

时考虑到后续模块中高温的影响.

## 4 综合软件介绍

根据上述器件与工艺综合的需要,我们开发了器件与工艺综合软件(modeling and synthesis system for process and device, MOSPAD). MOSPAD 系统采用基于跨平台的 java 语言,可以很容易地移植到各种操作系统,包括 Solaris、HP、Windows 等系统.整个综合系统采用了模块化的设计思想,各部分组件都易于扩充,可以适应不同的需要,并改进综合效果.

与过去的实验系统相比, MOSPAD 系统是一个综合考虑了器件与工艺综合的较完整的系统,并提供用户友好的图形界面.

在器件综合方面,对半导体器件采用了参数化的思想,可以很容易地设计自己需要的器件,并提供了相关参数的链接,使得综合结果更具意义.

在工艺综合方面,采用了开放式的思想,使用户可以自由地组合工艺步骤,形成自定义的工艺模块.这种方法使综合系统具有更广的应用范围,不仅可以调整现有工艺流程,还可以供开发者开发新工艺.目前,综合系统应用于 0.3 $\mu\text{m}$  工艺流程,今后将应用于 0.07 $\mu\text{m}$  以及将来的工艺流程.

MOSPAD 系统中还采用了响应表面方法(RSM)作为替代模拟器的重要手段,大大降低了综合所需要的时间.

## 5 采用 MOSPAD 系统的器件综合结果

本节将利用对一个 MOS 器件的沟道工程来说明本系统.这里器件沟长  $L$  为 0.35 $\mu\text{m}$ ,源漏结深  $X_j$  为 0.1 $\mu\text{m}$ ,栅氧厚度  $T_{\text{ox}}$  为 0.007 $\mu\text{m}$ ,衬底掺杂浓度  $N_{\text{sub}}$  为  $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ .

我们定义驱动电流  $I_{\text{on}}(V_d = 1.5\text{V}, V_g = 1.5\text{V})$ 、关断电流  $I_{\text{off}}(V_d = 1.5\text{V}, V_g = 0\text{V})$ ,饱和区微分电阻 ( $R_{\text{out}} = dV_d/dI_d$  at  $V_d = 1.5\text{V}, V_g = 1.5\text{V}$ ) 作为所关心的电学特性,如表 1 所示.

为提高微分输出电阻,改善短沟道效应,我们在沟道中进行了一次  $p^+$  注入,这种器件也称为 FIB-MOS 器件<sup>8</sup>.表 2 为所需器件特性要求.

表 1 最初的器件特性

Table 1 Initial device characteristics

Parameter	Value	Unit
$L_{on}$	$7.149 \times 10^{-4}$	A/ $\mu\text{m}$
$L_{off}$	$1.709 \times 10^{-7}$	A/ $\mu\text{m}$
$R_{out}$	6380.78	

表 2 所需的器件特性

Table 2 Desired device characteristics

Parameter	Objective value	Unit
$L_{on}$	$> 2 \times 10^{-4}$	A/ $\mu\text{m}$
$L_{off}$	$< 10^{-13}$	A/ $\mu\text{m}$
$R_{out}$	$> 10^5$	

假定这个注入为高斯分布,它可以用四个参数来表示:注入剂量  $D$ ,注入点和源端的距离  $X_{start}$ ,注入宽度  $X_{span}$ ,掺杂的峰值位置  $Y_{peak}$ 和掺杂的特征长度  $L_c$ .

本例中,根据制造工艺的实际行为, $X_{span}$ 被固定为  $0.01\mu\text{m}$ .我们将  $D$ 、 $X_{start}$ 、 $Y_{peak}$ 和  $L_c$  定为设计参数.对一次注入而言, $Y_{peak}$ 和  $L_c$  都与注入能量相关,它们之间有约束关系,可近似用如下公式表示为: $L_c = 0.17746 - 0.15492 \times e^{Y_{peak}/0.44417}$  (用 SUPREM<sup>9</sup> 中的表格得到的适配公式).设计空间如表 3 所示.

表 3 器件设计空间

Table 3 Design space of device

Parameter	Min	Max	Unit
$X_{start}$	0.05	0.3	$\mu\text{m}$
$D$	$5 \times 10^{11}$	$5 \times 10^{13}$	$\text{cm}^{-2}$
$Y_{peak}$	0.01	0.05	$\mu\text{m}$
$L_c$	$0.17746 - 0.15492e^{Y_{peak}/0.44417}$		$\mu\text{m}$

本系统搜索得到的可行设计参数如图 1 (图中黑点) 所示.

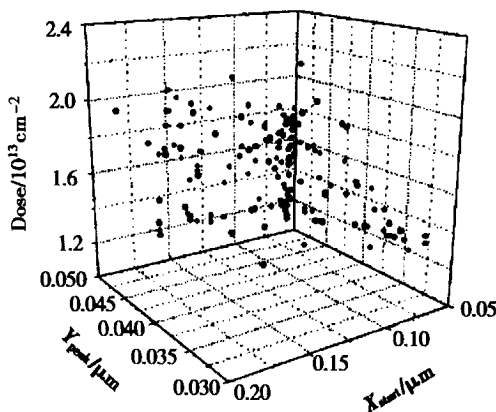


图 1 器件综合系统的结果

Fig. 1 Result of device synthesis system

## 6 采用 MOSPAD 系统的工艺综合结果

本节采用  $0.35\mu\text{m}$  阱形成工艺模块来介绍工艺综合的结果.本工艺模块包括三个工艺步骤:(1)初始氧化,(2)阱注,(3)阱推.第一个工艺步骤的目标是建立初始氧化层,但该氧化层在本工艺模块结束后将被刻掉,并且对本工艺模块及后续的工艺模块产生影响,所以可以认为该氧化层厚度是一个已知的常数.我们把该氧化层厚度设为  $0.03\mu\text{m}$ .后两个工艺步骤先在硅中注入一定剂量的杂质,然后通过高温长时间的扩散,使注入的杂质充分扩散.因此,在这个工艺模块中共有四个参数:注入剂量和能量,扩散温度和时间.

图 2、3 分别为不同剂量和能量下的离子注入结果的比较.由于扩散时采用高温长时间的工艺条件,我们可以看出扩散曲线的外观是相似的,并跟注入剂量和能量无关.从图 2 中可以看到,使用不同的注入剂量会得到不同的扩散曲线,但曲线的外观都是

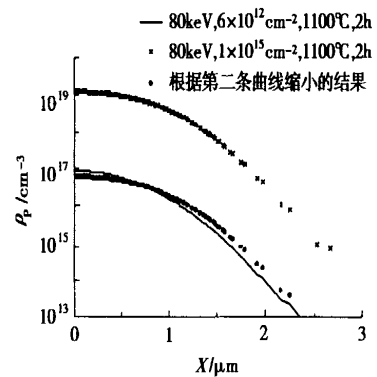


图 2 不同剂量离子注入结果比较

Fig. 2 Comparison of different implanting dose

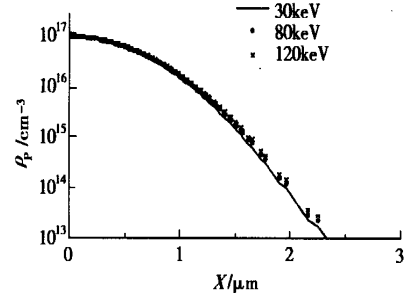


图 3 不同能量离子注入结果比较

Fig. 3 Comparison of different implanting energy

一样的. 从图 3 中可以看到, 使用不同的能量得到的都是同样的曲线. 因此, 可以得到结论, 注入能量在阱形成这个模块中并不是一个很敏感的参数, 因此, 我们在综合的过程中将其设为常数.

我们使用两个目标来描述阱, 即表面浓度和阱深, 根据这两个参数就可以确定一条扩散曲线. 用来综合的目标值分别为: 表面浓度  $6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 阱深  $3.9 \mu\text{m}$ .

综合得到很多结果, 如表 4 所示.

表 4 初次综合结果

Talbe 4 Synthesis result of first time

剂量/ $\text{cm}^{-2}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/min	表面浓度/ $\text{cm}^{-3}$	阱深/ $\mu\text{m}$
$7.93 \times 10^{12}$	1138.9	244.4	$6.02 \times 10^{16}$	3.88
$7.96 \times 10^{12}$	1139.1	248.6	$6.00 \times 10^{16}$	3.90
$7.90 \times 10^{12}$	1138.9	244.8	$6.01 \times 10^{16}$	3.88
...	...	...	...	...

作为工厂需要的参数, 不是任意的综合结果都可用的. 因此, 需要在算法得到的综合结果中进行选取. 首先将温度确定为工厂可以接受的  $1150^{\circ}\text{C}$ , 并综合剩下的两个参数. 综合结果如表 5 所示.

表 5 最终综合结果

Talbe 5 Final synthesis result

剂量/ $\text{cm}^{-2}$	时间/min	表面浓度/ $\text{cm}^{-3}$	阱深/ $\mu\text{m}$
$7.91 \times 10^{12}$	197.97	$5.99 \times 10^{16}$	3.89
$7.92 \times 10^{12}$	198.60	$5.99 \times 10^{16}$	3.89
...	...	...	...

可以看到剂量和时间两个参数依然有很多组合, 这样我们继续在这些组合中选择最可行的参数值. 最终的结果为: 剂量  $7.9 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ , 温度  $1150^{\circ}\text{C}$ , 时间  $200 \text{min}$ .

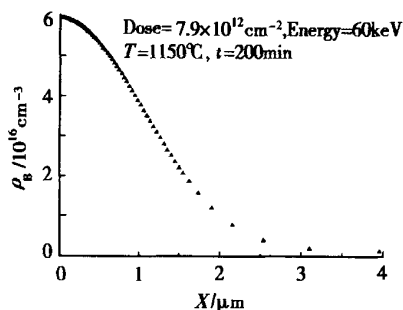


图 4 工艺综合结果

Fig. 4 Process synthesis result

根据工艺综合结果模拟得到的扩散曲线如图 4 所示.

## 7 结论

利用 MOSPAD 综合系统, 可以实现自顶向下的综合思想, 简化器件与工艺的设计过程.

致谢 本项目得到了摩托罗拉公司的支持, 感谢摩托罗拉公司半导体产品部 (SPS) 各位专家有益的讨论.

## 参考文献

- 1 ] Hosack H H, Mozumder P K, Pollack G P. Recent advances in process synthesis for semiconductor devices. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45(3): 626
- 2 ] Boning D S, Mozumder P K. DOE/Opt: a system for design of experiments, response surface modeling, and optimization using process and device simulation. IEEE Trans Semicond Manuf, 1994, 7(2): 233
- 3 ] Saxena S, Burch R, Vasanth K, et al. An application of process synthesis methodology for first-pass fabrication success of high-performance deep-submicron CMOS. IEDM, 1997: 149
- 4 ] Plasun R, Stockinger M, Selberherr S. Integrated optimization capabilities in the VISTA technology CAD framework. IEEE Trans Comput Aided Des Integr Circuits Syst, 1998, 17(12): 1244
- 5 ] Yang Zhilian, Shen Ming. Methodology of VLSI design. Beijing: Tsinghua University Press, 1999 杨之廉, 申明. 超大规模集成电路设计方法学导论. 北京: 清华大学出版社, 1999
- 6 ] Song S, Kim W S, Ha J M, et al. High performance transistors with state-of-the-art CMOS technologies. IEDM, 1999: 427
- 7 ] Morifuji E, Ohishi A, Miyashita K, et al. An 80nm dual-gate CMOS with shallow extensions formed after activation annealing and SALICIDE. IEDM, 1999: 649
- 8 ] Shen C C, Murguia J, Goldsman N, et al. Use of focused-ion-beam and modeling to optimize submicron MOSFET characteristics. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45(2): 453
- 9 ] TMA SUPREM4 user's manual. Technology Modeling Associates Inc, 1995

## Device and Process Synthesis of Semiconductor

Lu Yong , Xie Xiaofeng , Zhang Wenjun and Yang Zhilian

( *Institute of Microelectronics , Tsinghua University , Beijing 100084 , China* )

**Abstract :** With the methodology of process synthesis ,a practical top-down design method process and device are presented. And process synthesis software ,MOSPAD ,which implemented this idea ,is also provided. The idea and method in device synthesis and process synthesis are introduced. Design of FIB-MOSFET is acted as an example of device synthesis. And process module of well formation is acted as an example of process synthesis. It is proved this technology can be used in research of device and process.

**Key words :** synthesis ; device synthesis ; process synthesis ; MOSPAD ; FIB

**EEACC :** B2570A ; C1180 ; C7410D

**Article ID :** 0253-4177 (2002) 07-0772-05