

工艺综合与响应表面法的应用

鲁 勇, 张文俊, 郑期彤, 李 成, 杨之廉

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘 要: 工艺综合是一种自顶向下的工艺、器件设计方法. MOSPAD 软件系统是基于工艺综合的思想开发的工艺与器件辅助设计工具. 本文通过使用 MOSPAD 系统, 对工艺改进中的实际问题采用工艺综合的方法, 确定正确的工艺条件. 在工艺综合系统中使用响应表面法加快其综合的速度, 并利用响应表面模型以分析工艺窗口造成的灵敏度问题.

关键词: 工艺综合; 优化; 响应表面法 (RSM); 工艺窗口

中图分类号: TN405

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2002) 09-1274-04

Usage of Process Synthesis and Response Surface Method

LU Yong, ZHANG Wen-jun, ZHENG Qi-tong, LI Cheng, YANG Zhi-lian

(Institute of Microelectronic of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Process Synthesis is a new top-down design method of semiconductor device and process. MOSPAD software is a kind of TCAD tool, based on the process synthesis methodology. This paper introduced the usage of the process synthesis and Response Surface Method (RSM) by MOSPAD, which will provide the process conditions for the improvement of a Fab. RSM speed up the synthesis, and will be used to analyse the sensitivity of the process window.

Key words: process synthesis; optimization; response surface method (RSM); process window

1 引言

随着集成电路工业的发展, 半导体工艺界必须加快工艺的进步以适合高速发展的设计工业. 工艺综合的目标是开发一个系统的方法学用于缩短集成电路开发周期, 增加工程资源重新利用率, 以适合半导体工艺的发展^[1].

与传统的工艺设计不同, 技术综合是从所需设计的器件性能和描述出发, 采用自顶向下的方法, 并最终获得工艺步骤. 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. 如图1所示, 这种综合的思想与已被广泛应用的电路综合有着相似之处.

整个技术综合被分成两大部分: 器件综合和工艺综合. 器件综合的研究已经较完善^[2]. 工艺综合是技术综合的第二个部分. 在这个部分, 我们将从器件综合得到的器件结构出发, 获取工艺流程中的各种条件, 例如离子注入的能量和剂量、扩散的温度和时间等.

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, 不仅使器件的研究可以规范化, 还可以利用计算机辅助设计, 降低人力资源的消耗, 减少产品的开发周期.

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完成器件综合或工艺综合中部分功能. 早期的 DOE/Opt^[3] 系统引入了一些参数优化的概念, Sharad Saxena^[4] 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^[5] 系统实现了一些参数优化的工作.

基于工艺综合的思想的集成电路辅助设计工具 MOSPAD 已经开发成功. 在 MOSPAD 平台上, 我们针对某 MOS 工艺的改进, 使用了工艺综合的方法学并获得成功.

为了提高综合的速度, MOSPAD 系统中应用了响应表面法 (RSM) 建立数学模型, 大大减少 CPU 时间. 由于传统响应表面法的一些限制, 无法获得可以替代模拟器的精确响应表面模型, 经过研究改进的多分区响应表面法提供了获得精确模型的方法. 多分区响应表面法也被集成在 MOSPAD 系统中.

2 工艺综合

工艺综合是工艺模拟的反向过程. 工艺综合从最终的园

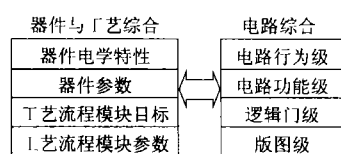


图1 器件与工艺综合与电路综合

片状态出发,以获取各工艺步骤中的工艺条件为目标,最终完成整个工艺流程。

工艺流程首先将被划分为多个工艺模块,这样可以简化综合内容。在每个模块内部,不同工艺步骤间的互扰是允许的,而模块间的互扰可以忽略不计。每个工艺模块包括某些工艺步骤并提供不同的功能,例如阱的形成模块、栅的形成模块等。由于高温长时间操作的工艺步骤在工艺流程的设计时一般被放在工艺流程靠前的位置,因此对模块间的互扰忽略不计的假设是合理的。在深亚微米工艺技术中(小于 $0.1\mu\text{m}$ 的工艺),热预算必须被考虑,主要是一些高温的 RTA 工艺步骤。为了解决这个问题,我们考虑在系统中增加一些逻辑模块。例如 RTA 将被作为逻辑模块加入每个实际的工艺模块,这样对于高温对前序工艺的影响也被考虑到。

每一个工艺模块都将根据输入的园片状态给出输出园片状态。为了可以适合综合算法,需要将每个模块的目标提取出来,并用于描述该输出园片的状态和工艺模块的功能,这些模块目标将在综合算法中使用。也可以说综合的目标需要被参数化。

由于工艺流程的特殊性,很多工艺步骤必须要在一些已完成的工艺步骤的基础上实现,因此整个工艺综合的次序也是需要仔细研究的。通常根据实际问题,从工艺流程的基本顺序出发,根据问题的复杂性,逐一确定各工艺模块综合的先后关系。

3 综合系统

我们已经完成了一个综合系统工具——MOSPAD 的开发,采用 Java 语言,因此可以跨平台使用。目前已通过 Solaris 和 HP Unix 系统的测试。在综合系统中使用了遗传算法作为综合算法。其它一些基于梯度的优化算法例如约束变尺度法等也被用于辅助遗传算法的工作。响应表面法也是系统中很重要的算法,可以用来建立解析模型以取代对模拟器的多次调用,可以实现大大提高系统进行综合的速度。

模块信息包括了参数和模块目标。为了进行有效的综合,建议首先进行预处理。这样可以得到如下三点好处:(1)通过将一个复杂问题划分为多个简单的子问题,可以缩小设计空间。(2)可以解决一些子问题间的耦合关系。(3)可以建立响应表面模型来加快系统综合的速度。

在系统中,模拟器和响应表面模型起着类似的作用。对综合算法而言,它们可以给出工艺参数和模块输出目标间的关系。

由于传统的响应表面模型无法正确的反映一个复杂空间的实际情况,新开发的多分区响应表面法被应用于综合系统并获得很好的效果。

最后,后处理也是非常重要的。通过后处理,可以将算法提供的纯数学结果反映到实际生产可以使用的数据,并对综合结果进行分析,包括灵敏度和工艺窗口的分析。

4 工艺综合的应用

本节采用某工艺线工艺改进时利用 MOSPAD 系统所做的

工作来说明工艺综合。原工艺采用 $1.2\mu\text{m}$,现改进至 $0.8\mu\text{m}$ 。

首先对器件尺寸进行分析。由于 CV 率通常只适用在 $2\mu\text{m}$ 以上工艺,因此采用 CE 率进行 Scaling Down。根据 CE 率,工艺从 $1.2\mu\text{m}$ 减小为 $0.8\mu\text{m}$,栅长为 $0.8\mu\text{m}$ 。工作电压从 5V 降为 3V,栅氧厚度从 250Å 降为 150Å,这样可以保证电场恒定。根据原工艺流程模拟出源漏结深为 $0.58\mu\text{m}$,所以新工艺结深为 $0.386\mu\text{m}$ 。

其次我们对器件电特性进行分析。在器件尺寸缩小的情况下,开启电压将缩小,根据 CE 率,设定开启电压期望值为 0.78V。同时为了保证器件工作时可以提供一定的驱动能力,同时满足 CE 率法则,我们希望工作饱和电流 I_{on} 不能低于 $1.0\text{e}-4\text{ A}/\mu\text{m}$ 。对于关断电流 I_{off} ,为了保证器件的正常工作,不希望大于 $1\text{e}-12\text{ A}/\mu\text{m}$ 。

改变工艺中的一些参数,发现:调开启注入的能量和剂量对开启电压 V_t 、 I_{on} 、 I_{off} 影响均比较大。LDD 注入的能量和剂量对开启电压无影响,对 I_{on} 、 I_{off} 有一定影响。 N^+ 注入的能量和剂量对开启电压和 I_{on} 均无影响,只对 I_{off} 有少许影响。

另外,由于场氧与场注均沿用 $1.2\mu\text{m}$ 工艺,所以不再考虑。

综上所述,我们把新工艺划分为如下工艺模块:

(1)调开启工艺模块:

(a) 参数:调开启注入的能量和剂量

(b) 目标:开启电压 $V_t = 0.78\text{V}$

(2)LDD 注入工艺模块:

(a) 参数:LDD 注入磷的能量和剂量

(b) 目标: $I_{\text{on}} > 1.0\text{e}-4\text{ A}/\mu\text{m}$

$I_{\text{off}} < 1\text{e}-12\text{ A}/\mu\text{m}$

(3) N^+ 注入工艺模块:

(a) 参数: N^+ 注入的能量和剂量

(b) 目标:结深 $X_j = 0.386\mu\text{m}$

回流被作为一个逻辑模块同时放在这三个模块中。

(1)由于器件特性需要整个工艺流程完成才可以计算,因此我们首先对尺寸方面的工艺进行综合,得到综合结果如表 1、图 2 所示,其中注入杂质为砷, NMOS 直接做在衬底上,衬底浓度为 $1\text{e}15\text{cm}^{-3}$ 。

表 1 N^+ 注入工艺模块综合结果

能量(KeV)	剂量(cm^{-2})	结深(μm)
28.9674	4.3095E15	0.3873
28.4342	4.6487E15	0.3859
28.8756	4.2513E15	0.3844
...

表 2 调开启工艺模块综合结果

能量(KeV)	剂量(cm^{-2})	开启电压(V)
86.3150	2.4591E12	0.7828
87.6024	2.4494E12	0.7788
86.9889	2.4598E12	0.7820
...

从中选定注入能量 $\text{Energy} = 29\text{keV}$,注入剂量 $\text{Dose} = 4.26\text{e}15\text{cm}^{-2}$ 。

(2)然后针对开启电压进行综合,注入杂质 BF_2 ,可以得到调开启注入的综合结果,如表 2、图 3 所示。

确定调开启注入能量 $\text{Energy} = 87\text{KeV}$,注入剂量 $\text{Dose}' = 2.45\text{e}12\text{cm}^{-2}$ 。

(3)最后综合 LDD 注入模块,注入的杂质是磷。由于本工艺模块约束条件较宽松,因此得到的结果较多,如表 3、图 4 所示。

表 3 LDD 注入模块综合结果

能量 (KeV)	剂量 (cm^{-2})	$I_{\text{on}}(\text{A})$	$I_{\text{off}}(\text{A})$
20.981	5.808E13	1.121E-4	3.368E-14
25.684	6.836E13	1.157E-4	1.221E-13
26.781	7.042E13	1.165E-4	1.754E-13
...

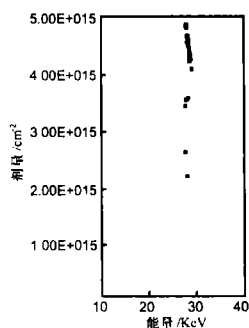


图 2 N^+ 注入工艺模块的可行空间

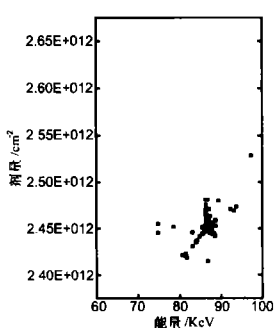


图 3 调开启工艺模块的可行空间

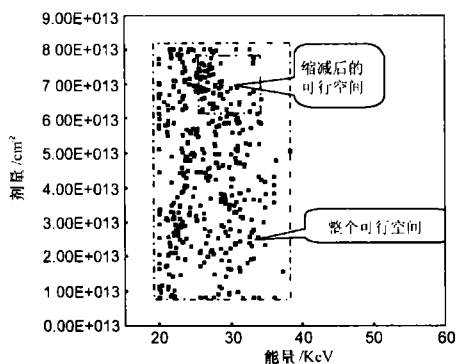


图 4 LDD 注入模块的可行空间

5 响应表面法的应用

响应表面法不仅可以在综合过程中取代模拟器提高速度,还可以实现采用模拟器较难完成的功能。对于上述工艺模块,采用响应表面法可以分析其工艺窗口的影响,这样可以确定最终综合结果的选择。

由于涉及到不同参数对最终器件的影响必须考虑在参数点的梯度问题,如果采用通常的模拟或实验的方法,时间太长,因此采用 RSM 分析工艺窗口的影响是非常有效的手段。

为了可以正确的反映工艺情况,一个准确的 RSM 模型是非常必要的。可以从两种途径考虑,一个是对参数点附近做响应表面模型,这样的模型由于只反映一个小范围响应表面,因此通常是比较准确的。而如果需要在整个空间分析,则需要使

用多分区响应表面法。

首先考虑开启电压。

从开启电压的综合结果看出参数基本变化范围不是很大,所以仅对参数点附近 $\pm 10\%$ 的范围进行常规响应表面建模。

采用中心组合实验设计方法,得到模型如下:

$$V_t = -1.1102 + 0.2086 * \text{Energy}' + 0.6308 * \text{Dose}' - 0.009989 * \text{Energy}' * \text{Energy}' - 0.0134 * \text{Energy}' * \text{Dose}' - 0.0553 * \text{Dose}' * \text{Dose}'$$

其中, $\text{Energy}' = \text{Energy}/10$, $\text{Dose}' = \text{Dose}/1\text{e}12$; $7.5 < \text{Energy}' < 9$, $2 < \text{Dose}' < 2.8$ 。

分别对能量和剂量在参数点求偏导数,可得:

$$\frac{\partial V_t}{\partial \text{Energy}'} = 0.2086 - 0.01998 * \text{Energy}' - 0.0134 * \text{Dose}' = 0.0019440$$

$$\frac{\partial V_t}{\partial \text{Dose}'} = 0.6308 - 0.0134 * \text{Energy}' - 0.1107 * \text{Dose}' = 0.243$$

由偏导数的计算,我们可以看出对开启电压影响较大的是剂量,而能量的影响相比可以忽略不计。

采用相同的方法,同样可以分析 LDD 注入模块的工艺窗口影响情况,针对 LDD 综合结果较广泛,需要采用多分区响应表面法对全设计空间做出响应表面模型,再在可行空间利用该区域的响应表面模型分析可行空间中的灵敏度情况。图 5、图 6 分别表示在可行空间中的工作电流关于能量和剂量的灵敏度。

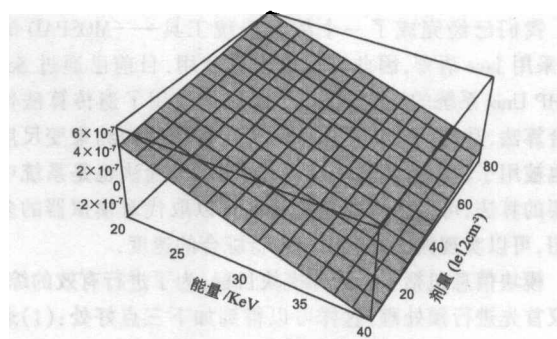


图 5 工作电流关于能量的灵敏度曲面

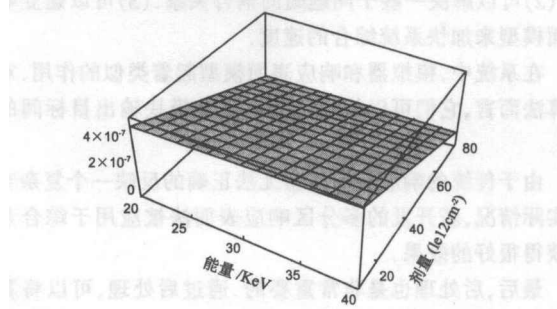


图 6 工作电流关于剂量的灵敏度曲面

$$\frac{\partial I_{\text{on}}}{\partial \text{Energy}'} = 0.128 - 0.00394 * \text{Energy}' + 2.17\text{E-}4 * \text{Dose}'$$

$$\frac{\partial I_{on}}{\partial Dose'} = 0.0497 + 2.17E-4 * Energy' - 6.1E-4 * Dose'$$

可以看出能量较小剂量较小的区域工艺窗口的影响最大,能量较小剂量较大的区域能量对 I_{on} 的影响较大,能量较大剂量较小的区域剂量对 I_{on} 的影响较大,只有能量较大剂量也较大的区域二者的影响均较小。根据上述分析,可行空间缩减到原可行空间的右上角,如图 4 所示。另一方面,在实际工艺中,低能注入较难以实现,因此新的可行空间中能量数值较大,也适应了实际工艺的需要。

在新的可行空间中选取 LDD 注入能量 36keV, 剂量 $4.3e13cm^{-2}$, 利用模拟器对所有选取的综合结果进行验证, 可以得到模拟结果:

$$V_t = 0.788V$$

$$I_{on} = 1.12e - 4A/\mu m$$

$$I_{off} = 5e - 13A/\mu m$$

满足事先约定的综合目标,综合完成。

6 结论

本文通过介绍采用工艺综合思想对某 $0.8\mu m$ 工艺线的改进工作,说明了工艺综合的思想及综合工具 MOSPAD 的用途。工艺综合被证明是提高半导体工艺改进和设计速度的有利工具。同时采用响应表面法,不仅加快了综合速度,而且完成了通常采用模拟器不容易进行或所需代价较大的工作。

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各位专家有益的讨论。

参考文献:

- [1] Harold H Hosack, Purnendu K Mozumder, Gordon P Pollack. Recent advances in process synthesis for semiconductor devices [J]. IEEE ED, 1998, 45(3): 626 - 633.
- [2] Li Zhao, Yang Zhilian, Realization of device decomposition for process synthesis and its application on the Focused-Ion-Beamed (FIB) MOS FET [A]. the 16th World Computer Congress [C]. Beijing, China: 2000. 355 - 359.
- [3] Duane S Boring, P K Mozumder. DOE/Opt: A system for design of experiments, response surface modeling, and optimization using process and device simulation [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1994, 7(2): 233 - 243.
- [4] Shared Saxena, Richard Burch, Karthik Vasanth, Suraj Rao. An Application of process synthesis methodology for first-pass fabrication success of high-performance deep-submicron CMOS [A]. IEDM [C]. New York, NY, USA: 1997. 149 - 152.
- [5] R Plasun, M Stockinger, Siegfried selberherr, integrated optimization capabilities in the VISTA technology CAD framework [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 1998, 17(12): 1244 - 1251.

作者简介:



鲁 勇 男, 1977 年 11 月出生于安徽省宣城市, 1997 年获清华大学理学学士学位, 现攻读清华大学微电子学研究所博士学位, 研究兴趣为半导体工艺模拟与综合。



张文俊 男, 副教授, 1963 年 1 月出生于辽宁省沈阳市, 分别于 1985 年和 1988 年在北京理工大学电子工程系获工学学士和工学硕士学位。1996 年在航天部 771 所计算机器件与设备专业获工学博士学位, 随后进入清华大学微电子学研究所做博士后研究工作, 于 1998 年 9 月出站并留校任教, 目前的主要研究方向包括: 集成电路工艺与器件的建模与综合, 极小尺寸器件模拟工具的研究与开发, RF 器件的建模与模拟工具的研究与开发, 在国内外期刊和会议发表学术论文三十余篇。