

响应表面法在工艺综合中的应用

鲁 勇 张文俊 杨之廉

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 通过实例, 介绍多分区响应表面法的优点及其给工艺综合带来的好处, 并用其构建的响应表面模型分析工艺窗口带来的影响.

关键词: 响应表面法; 多分区响应表面法; 工艺综合; MOSPAD; 工艺窗口

EEACC: B0260; B2550; C1180; C7410D

中图分类号: TN405

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)10-1116-05

1 简介

工艺综合技术在半导体集成电路的研究中已有较多的应用. 通过这种自顶向下的新的器件与工艺设计方法, 改变了过去手工逐步修改器件、工艺参数的调整过程, 减小了人为因素的误差. 通过计算机辅助设计, 降低人力资源的消耗, 缩短了产品的开发周期^[1].

在工艺综合的算法过程中, 模拟器被大量调用, 因此将耗费大量的 CPU 时间. 为了加速工艺综合的过程, 通常使用响应表面法建立响应表面模型来替代模拟器的使用^[2,3].

响应表面法是一种通过一定数目的预先设计的实验来确定输入参数与输出之间的关系的方法. 通常称输出为响应表面, 因此称为响应表面法.

响应表面法以较小的代价研究整个设计空间中对象的情况, 因此响应表面法在工艺界已被广泛应用. 由于综合是一种工艺、器件模拟的反向过程, 而反向模型通常都很难获得, 因此利用响应表面法建立纯数学的解析模型是有效的一种方法.

传统的响应表面法可以很好的反映表面在整个设计空间中的变化趋势, 但却不能保证在整个设计空间每组输入参数都可以得到与实际表面很准确的

结果. 因此, 在应用于工艺综合时, 由于综合算法需要很准确的模拟器替代者, 传统的响应表面法必须加以改进才可以很好的应用.

Xie 等人采用模糊逻辑的方法对传统响应表面法加以改进, 得到了与模拟结果较符合的响应表面, 但需要进行多次实验设计^[4]. Waring 等人采用协方差结构改进响应表面, 对响应表面在某些区域的小误差进行修正^[5]. 但这些方法都只能适用在一些较小的设计空间, 如果应用于工艺综合系统, 只能作为灵敏度分析而无法在整个空间替代模拟器, 因此并不能加速工艺综合.

2 响应表面法

响应表面模型是一个基于数学方法的纯解析模型, 没有任何物理意义. 建立响应表面模型前需要做一些实验, 以确定设计空间中表面的分布情况. 实验点并非随便选取, 而且也并非实验点选的越多建立的模型越准确. 通常选取实验点的方法被称为实验设计 (design of experiment, DOE), 常用的 DOE 方法包括中心组合法 (center composite design)、全因子法 (full factor design)、拉丁方采样 (Latin hypercube sampling) 等^[6,7].

最希望得到的实验设计方法需要的实验点越少

鲁 勇 男, 1977 年出生, 博士研究生, 现从事工艺模拟与综合的研究工作.

张文俊 男, 副教授, 研究兴趣为半导体集成电路 CAD 技术.

杨之廉 男, 教授, 博士生导师, 研究兴趣为半导体集成电路 CAD 技术.

2002-01-04 收到, 2002-05-31 定稿

越好,但随着参数的增加,所有的设计方法需要的实验数越来越多,不同的实验设计需要的实验点也不一样.使用中心组合法,3个参数的实验设计需要15次模拟,4个参数的实验需要设计25次模拟.而使用全因子法,3个参数的实验设计需要27次模拟,4个参数的实验设计需要81次模拟.可见一个适当的设计方法对建立准确的响应表面法非常重要.

下面简单介绍这几种实验设计法.

中心组合法是一种使用非常广泛的实验设计方法.整个设计被分成两个部分:首先找到中心点和边角的点.其次找到各方向轴上的点.图1所示为一个二维实验设计的图例.

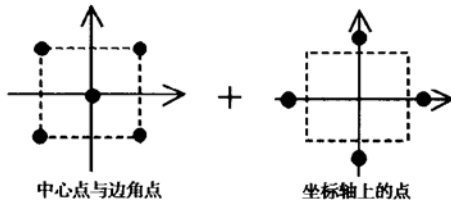


图1 中心组合法实验设计

Fig. 1 DOE of center composite design

全因子法实验设计需要的实验点比较多,而且随着输入参数的增加会呈指数形式增加,因此通常很少用于构建响应表面模型.图2所示为一个三维三水平的实验设计图例.根据要求的不同水平数,在每个方向上等距离的划分格点,每个交叉的格点均为一个实验点.

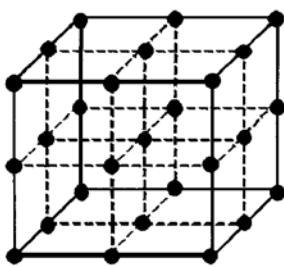


图2 全因子法实验设计

Fig. 2 DOE of full factor design

拉丁方采样是另一种重要的设计方法.图3所示为一个二维的实验设计图例.该实验设计方法在整个设计空间根据正交数列将全空间分为 r^n 个等概率的区间(其中 r 为需要的实验设计数, n 为输入参数的数目).根据拉丁方采样法得到的实验点可以最大程度的减小不同实验点的误差给系统分析带来

的错误,可以达到分层蒙特卡洛采样得到的实验点所能获得的误差精度.拉丁方采样对于探索该设计空间整体分布并最大程度减少实验次数都很有意义.

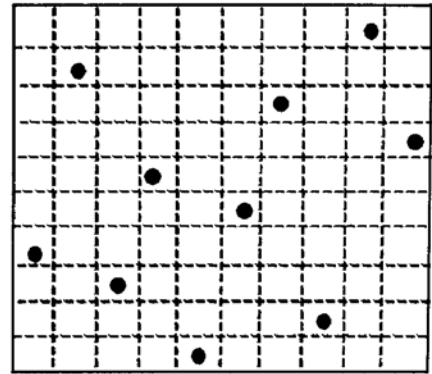


图3 拉丁方采样实验设计

Fig. 3 LHS design

做完实验设计,根据已有的实验点数据,响应表面模型将被构建.通常使用的响应表面模型包括线性二次等模型,为了更适合不同场合的应用,在工艺综合中还将对某些参数或表面进行一些数学变换.

3 多分区响应表面法

由于实际模拟器所反映的表面非常复杂,采用单一模型的响应表面模型在整个设计空间只能反映表面的变化趋势,但却不能精确地作为实际模拟器的替代者.研究发现在小范围的设计空间做出的响应表面模型通常比较符合作为工艺、器件模拟器的替代者所需的精度,因此我们开发了一种多分区响应表面法作为工艺综合中模拟器的替代者.

多分区响应表面法将整个设计空间分成若干小区域,针对每个小区域独立建立适当的响应表面模型.由于各小区域的响应表面模型都可以达到一定的精度,因此在全空间的响应表面模型同样可以视为精确的模拟器替代者.

如果将整个设计空间划分为若干小区域,需要对整个设计空间的分布情况有较详细的研究.针对不同区域各表面的不同形状进行分区,或者将整个空间尽可能多的划分成很多区域,以保证每个区域内模型的准确性.这两种方法都需要在确定如何分区上花费很大的代价,前者需要很多的人工干预,并首先进行多次实验,在所研究的对象已经很明确

的情况下才可以进行分区,这往往需要大量的实验或模拟;后者由于盲目分区造成需要的实验点过多,而且不能预知是否可以满足所有区域的精度要求,不能做出最优的实验点.因此需要一种很好的方法可以自动按照设计空间中表面的不同形状进行划分,并且必须使划分后的区域模型满足一定的精度要求.

满足上述条件的自动划分区域的多分区响应表面法(multi-region response surface method)已经集成在我们开发的工艺综合软件 MOSPAD 中.根据事先确定的精度要求,算法将检查区域中的响应表面模型是否达到要求.如果精确度不足,则将对不同的参数方向试探分区,最后根据可以获得的最好的分区结果决定最终的分区方向,将整个目标空间划分为两个区域.经过对所有区域的分析,最终将提供符合精确度要求分区结果,并且每个区域将包括自己独立的响应表面模型.

在 MOSPAD 系统中,根据设计空间的具体情况,响应表面模块将在尽可能减少实验点的情况下对空间进行分区,并对无法满足建模条件的区域补充实验点,这些都是由系统控制自动完成.多分区响应表面法所需采样点比常规表面法多,二维情形通常需要 20~40 次,三维情形 30~60 次,具体采样次数要根据实际表面的复杂程度决定.虽然代价加大,但仍可以接受.相对于调用模拟器达几百、上千次的工艺综合,采用多分区响应表面法不仅可以提供准确的模拟替代模型,而且可以实时完成综合.

多分区响应表面法不仅可以应用于二维情形,对多维情形同样适用.

4 多分区响应表面法的应用

本节针对在某 $0.8\mu\text{m}$ 工艺综合过程中的 LDD 注入工艺模块进行考察,并利用 MOSPAD 系统集成多分区响应表面法建模,对工艺参数进行分析.

在本工艺模块中,包括两个工艺参数,即离子注入的能量和剂量.研究的对象为驱动电流 I_{on} .

我们在整个设计空间分别画出驱动电流的实际曲面、传统响应表面法的模型曲面以及采用多分区响应表面法的模型曲面.结果分别如图 4 5 6 所示.

从图 4 可以看出,驱动电流在全空间中的表现较为复杂,其中包括几处突起和凹陷,并表现的不规则.图 5 为采用中心组合法实验设计得到的响应表面模型,虽然在整体设计空间反映了驱动电流的变

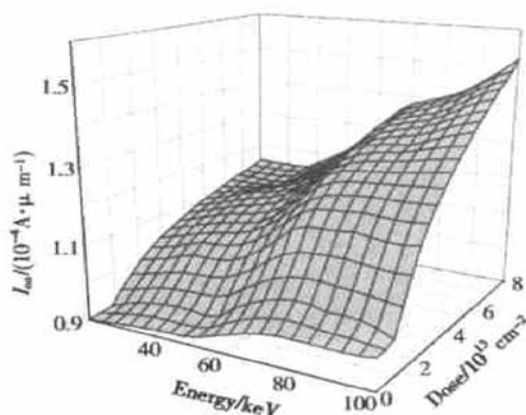


图 4 模拟器得到的实际曲面
Fig. 4 Real surface from simulator

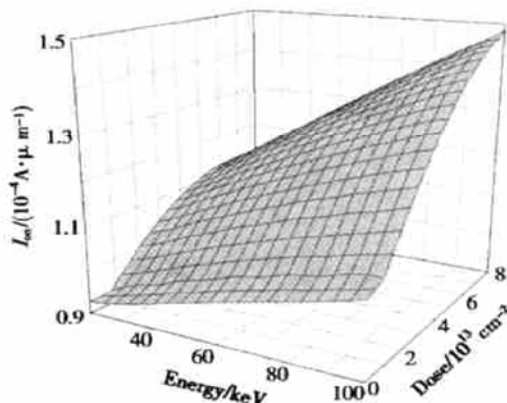


图 5 中心组合法实验设计得到的响应表面模型
Fig. 5 Response surface from center composite design

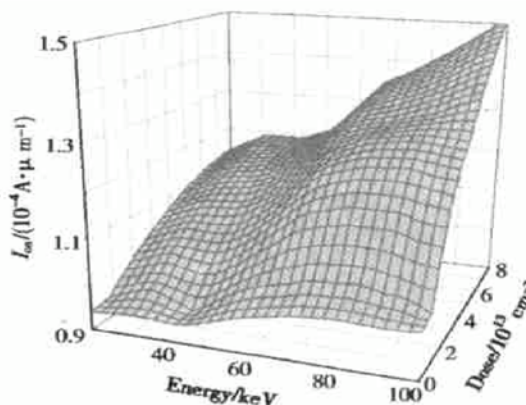


图 6 多分区响应表面模型
Fig. 6 Response surface from multi-region RSM

化趋势,但很明显无法与实际曲面一致,不能表现驱动电流的实际情况. 尽管该响应表面模型可以用于简单分析驱动电流与注入能量和剂量的关系,但无法作为模拟器的替代者用于工艺综合.

图 6 为 MOSPAD 系统集成的多分区响应表面法构建的模型,可以很明显地看出该曲面与实际曲面之间的接近程度. 多分区响应表面模型已经基本符合驱动电流在全空间的变化,尤其是在多处峰和谷的地方都表现出一致性. 从具体数据上看,基本上可以将模拟结果与 RSM 模型结果的误差控制在 1% 以内.

在这个实例中,多分区响应表面法自动将整个设计空间分成 5 个区域,如图 7 所示. 对应每个区域,响应表面模型为:

区域 1:

$$I_{on}' = 7.256 + 0.128 \times \text{Energy}' + 0.0497 \times \text{Dose}' - 0.00197 \times \text{Energy}' \times \text{Energy}' + 0.000217 \times \text{Energy}' \times \text{Dose}' - 0.000305 \times \text{Dose}' \times \text{Dose}'$$

区域 2:

$$I_{on}' = 38.158 - 1.334 \times \text{Energy}' + 0.1007 \times \text{Dose}' + 0.0151 \times \text{Energy}' \times \text{Energy}' - 0.0004091 \times \text{Energy}' \times \text{Dose}' - 0.0005466 - 4 \times \text{Dose}' \times \text{Dose}'$$

区域 3:

$$I_{on}' = 24.45 - 0.669 \times \text{Energy}' + 0.0952 \times \text{Dose}' + 0.00722 \times \text{Energy}' \times \text{Energy}' - 0.00024 \times \text{Energy}' \times \text{Dose}' - 0.0005777 \times \text{Dose}' \times \text{Dose}'$$

区域 4:

$$I_{on}' = 3.7889 + 0.138 \times \text{Energy}' + 0.134 \times \text{Dose}' - 0.0008993 \times \text{Energy}' \times \text{Energy}' + 0.00060205 \times \text{Energy}' \times \text{Dose}' - 0.00215 \times \text{Dose}' \times \text{Dose}'$$

区域 5:

$$I_{on}' = 14.81 - 0.08867 \times \text{Energy}' - 0.00462 \times \text{Dose}' + 0.00041755 \times \text{Energy}' \times \text{Energy}' + 0.0008979 \times \text{Energy}' \times \text{Dose}' - 0.0002716 \times \text{Dose}' \times \text{Dose}'$$

其中 $I_{on}' = 10^5 I_{on}$, $\text{Energy}' = \text{Energy}$,

$$\text{Dose}' = 10^{-12} \text{Dose}$$

所有区域的模型都是纯数学的二次模型,没有任何物理意义,但是可以应用于工艺综合作为模拟

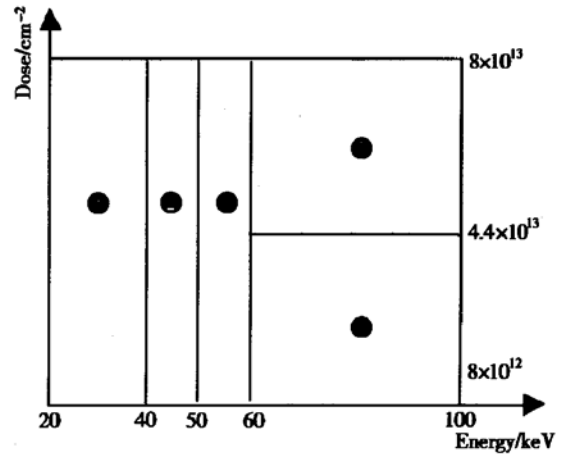


图 7 设计空间被划分的区域

Fig. 7 Region of design space

器的准确的替代者. 利用解析的响应表面模型,可以加速综合过程,还可以考察工艺窗口给器件性能带来的影响.

综合结果表明,可行区域处于多分区模型的区域 1,因此对该区域的模型进行分析.

$$\frac{\partial I_{on}}{\partial \text{Energy}'} = 0.128 - 0.00394 \times \text{Energy}' + 0.000217 \times \text{Dose}'$$

$$\frac{\partial I_{on}}{\partial \text{Dose}'} = 0.0497 + 0.000217 \times \text{Energy}' - 0.00061 \times \text{Dose}'$$

这两个方程分别表示驱动电流关于注入能量和注入剂量的灵敏度. 灵敏度越大,工艺窗口的影响越大. 图 8.9 为驱动电流关于能量和剂量的灵敏度在可行区域的分布情况.

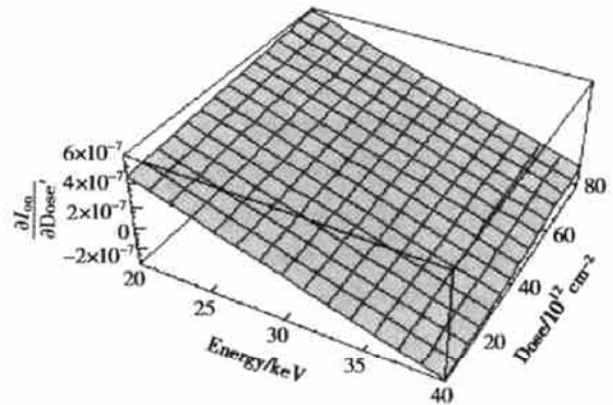


图 8 驱动电流与能量的灵敏度关系

Fig. 8 Sensitivity of energy

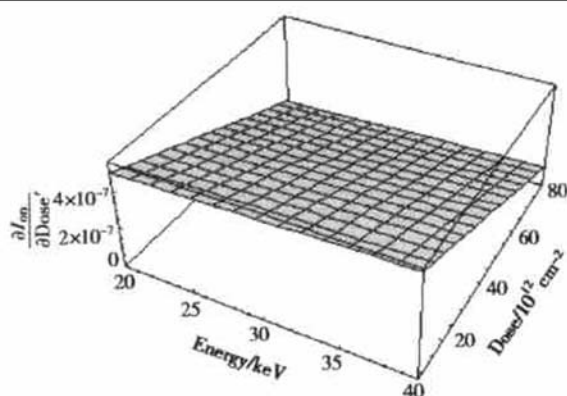


图9 驱动电流与剂量的灵敏度关系
Fig. 9 Sensitivity of dose

如图所示, 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. 因此在综合考虑可行区域与工艺窗口的影响, 可以确定一个符合设计要求的最优解.

5 结论

响应表面法在工艺综合中的应用提高了工艺综合的速度, 对于一些采用传统手段分析代价较高或较难完成的对象, 响应表面法也可提供良好的解决方案.

Using Response Surface Method for Process Synthesis

Lu Yong, Zhang Wenjun and Yang Zhilian

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

Abstract: To take place the process and device simulator, a new RSM, named multi-region RSM, is developed, which integrated into the MOSPAD system. The advantage of MR-RSM is presented, and the analysis of process window is also based on the MR-RSM.

Key words: response surface method; MR-RSM; process synthesis; MOSPAD; process window

EEACC: B0260; B2550; C1180; C7410D

Article ID: 0253-4177(2002)10-1116-05

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] Biles W E, Swain J J. Optimization and industrial experimentation. New York: Wiley, 1980
- [3] Alvarez A R, Abdi B L, Young D L, et al. Application of statistical design and response surface methods to computer-aided VLSI device design. *IEEE Trans Comput-Aided Design*, 1988, 7(2): 272
- [4] Xie H, Lee Y C, Mahajan R L, et al. Process optimization using a fuzzy logic response surface method. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A*, 1994, 17(2): 202
- [5] Waring T G, Waton A J, Ferguson S, et al. Application of covariance structures to improve the fit of response surface to simulation data. *IEEE Trans Semicond Manuf*, 1999, 12(3): 366
- [6] Box G E P, et al. Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building. New York: Wiley, 1978
- [7] Owen A B. Controlling correlations in Latin hypercube samplings. Tech Rep, Dept of Statist. Center for Integrated Syst, Stanford Univ, 1991

Lu Yong male, was born in 1977, PhD candidate. He is engaged in the research on process simulate and synthesis.

Zhang Wenjun male, associate professor. He is engaged in the research on IC CAD.

Yang Zhilian male, professor. He is engaged in the research on IC CAD.

Received 4 January 2002, revised manuscript received 31 May 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics