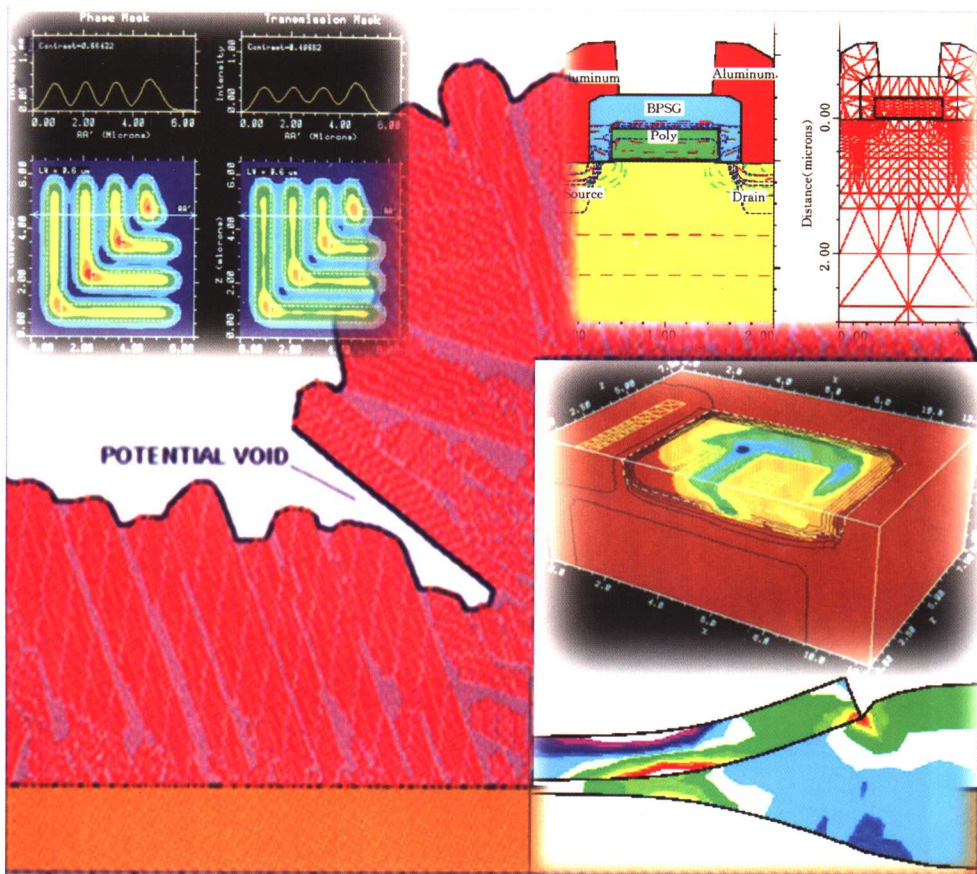




集成电路工艺 和器件的计算机模拟

— IC TCAD 技术概论

阮刚 编著



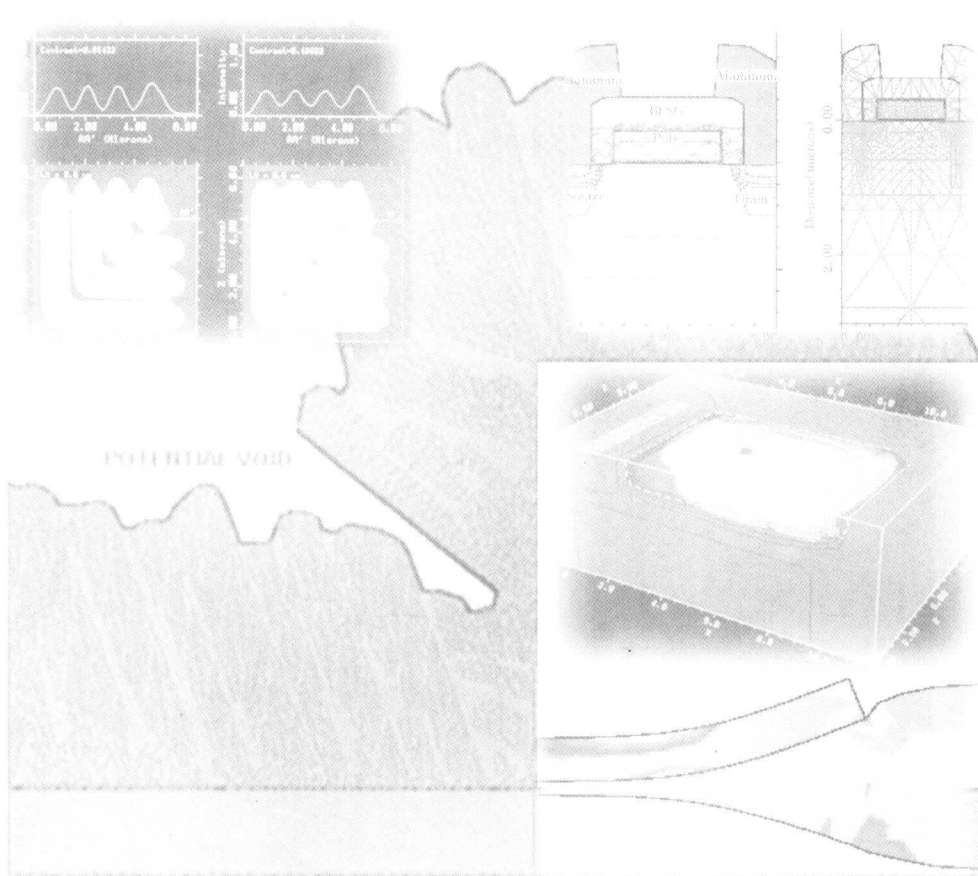


集成电路工艺 和器件的计算机模拟

— IC TCAD 技术概论

阮刚 编著

IC
TCAD



图书在版编目(CIP)数据

集成电路工艺和器件的计算机模拟:IC TCAD 技术概论/阮刚编著.
—上海:复旦大学出版社,2007.3
(复旦博学·微电子学系列)
ISBN 978-7-309-05364-7

I. 集… II. 阮… III. ①集成电路工艺-计算机模拟②集成电路-
电子器件-计算机模拟 IV. TN4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 004394 号

集成电路工艺和器件的计算机模拟——IC TCAD 技术概论

阮 刚 编著

出版发行 复旦大学出版社 上海市国权路 579 号 邮编 200433
86-21-65642857(门市零售)
86-21-65118853(团体订购) 86-21-65109143(外埠邮购)
fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

责任编辑 梁 玲

总 编 辑 高若海

出 品 人 贺圣遂

印 刷 常熟市华顺印刷有限公司

开 本 787×960 1/16

印 张 19.75 插页 4

字 数 376 千

版 次 2007 年 3 月第一版第一次印刷

印 数 1—3 100

书 号 ISBN 978-7-309-05364-7/T·309

定 价 36.00 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究



作者简介

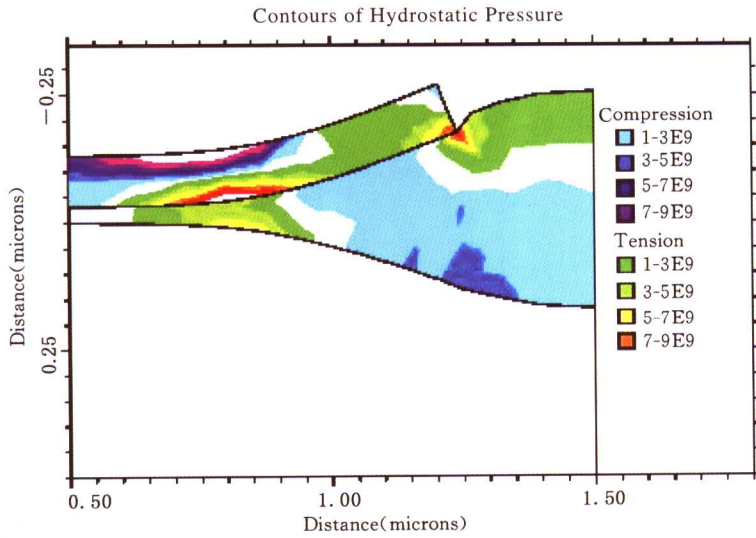
阮刚，复旦大学教授，微电子及固态电子学专业博士生导师。1956~1958年在北京大学加入五校半导体联合教研室，参与创办我国第一个半导体专业。1960年初在复旦大学领导一个青年科研组，研制成功了我国第一批锗集成电路。长期从事半导体器件工艺、物理、模型和模拟的教学和研究工作，已合作编译出版专业书5本，单独和合作发表论文200余篇。曾是美国Illinois大学高级访问学者，新加坡Nanyang理工大学访问教授，德国Chemnitz技术大学顾问教授及德国Fraunhofer微集成研究所高级科技顾问。

内 容 提 要

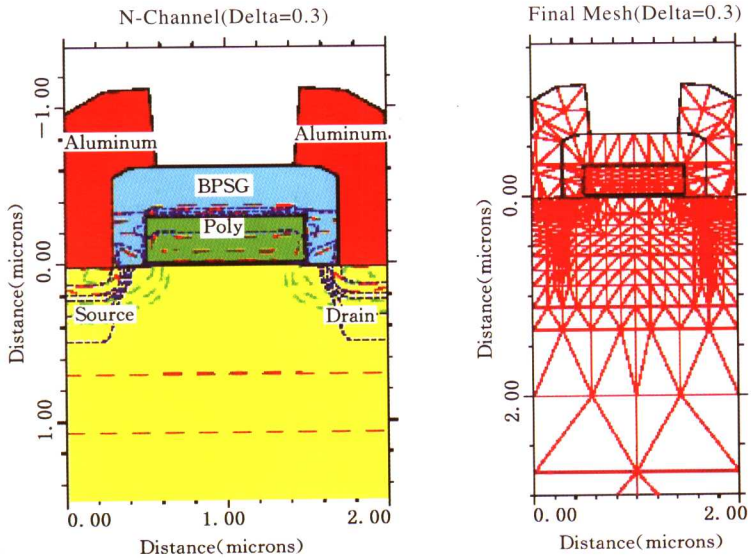
集成电路工艺和器件的计算机模拟，国际上也称作 IC TCAD，是少数几种有能力缩减集成电路开发周期和研制费用的技术之一。

本书以介绍集成电路工艺和器件的模拟器为主线，概论 IC TCAD 技术早期的可实用的成果、随后的多方面发展、当今的研究进展和商用化现状，以及近期和远期的困难挑战和能力需求。

本书适用于大学微电子或其他相关专业的硕士 / 博士研究生或高年级本科生作教材或教学参考书。本书作为一本 IC TCAD 技术的入门书，也适用于有需要或有兴趣在 IT 领域工作的研发、生产和管理人员。

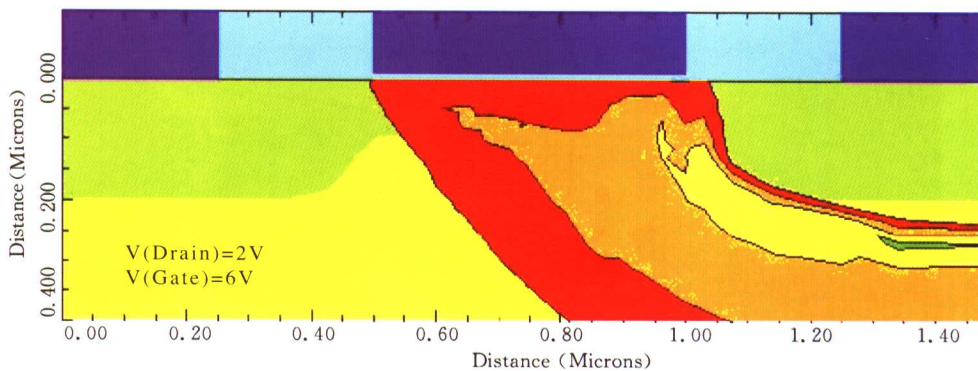


彩图1 流体静压力分布图（源于 [2.6]）
（用于正文 § 2.7.5.2）

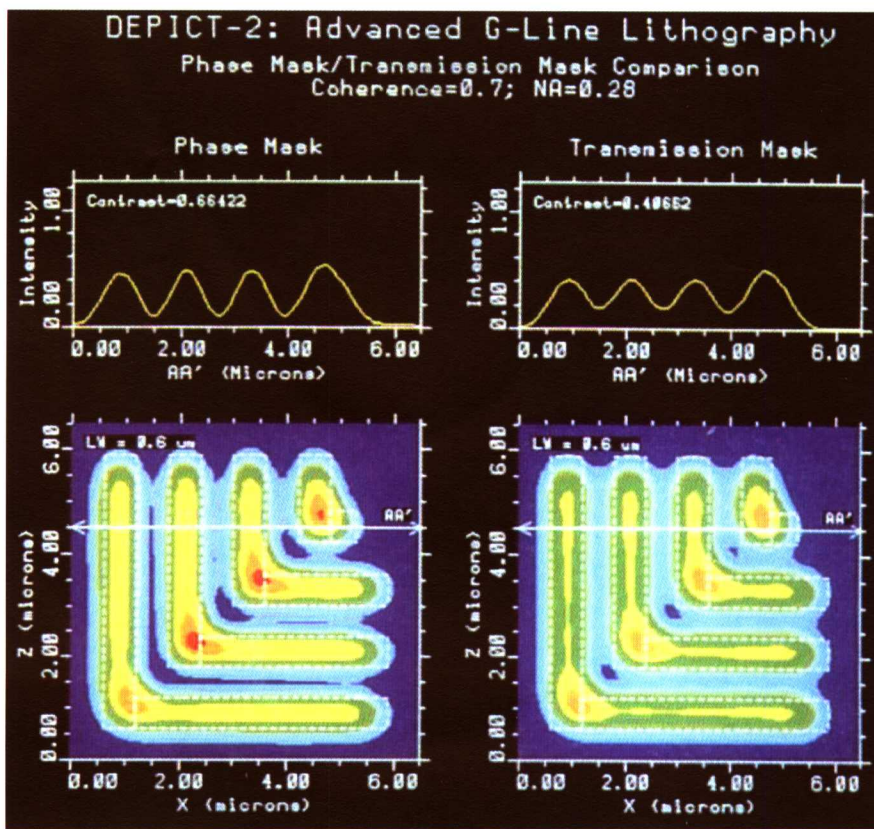


(a) 最终的 $0.8\mu\text{m}$ NMOS结构图. 图中包含了硼、磷和砷的等浓度线, 磷LDD区域清楚可见, 从重掺杂砷源/漏伸展到多晶硅栅的边缘
(b) 最终的 $0.8\mu\text{m}$ NMOS结构的网格图

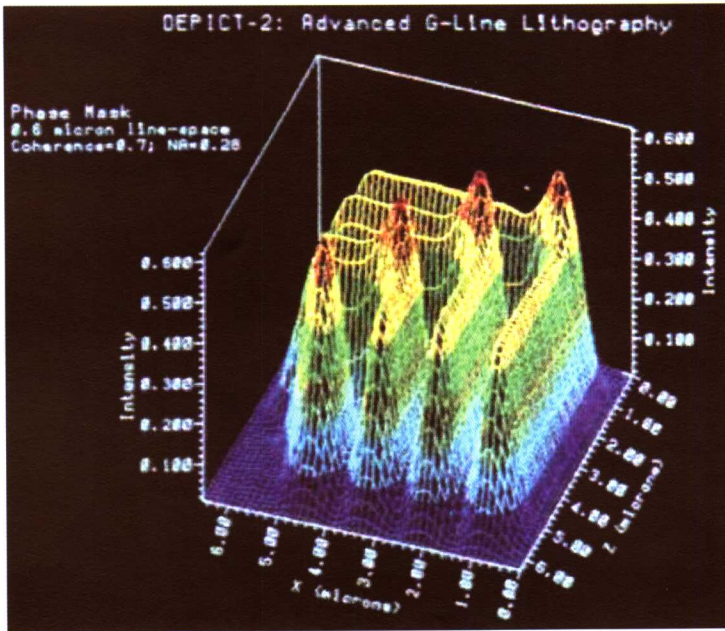
彩图2 最终的 $0.8\mu\text{m}$ NMOS结构及模拟网格结构（源于 [2.6]）
（用于正文 § 2.7.5.3）



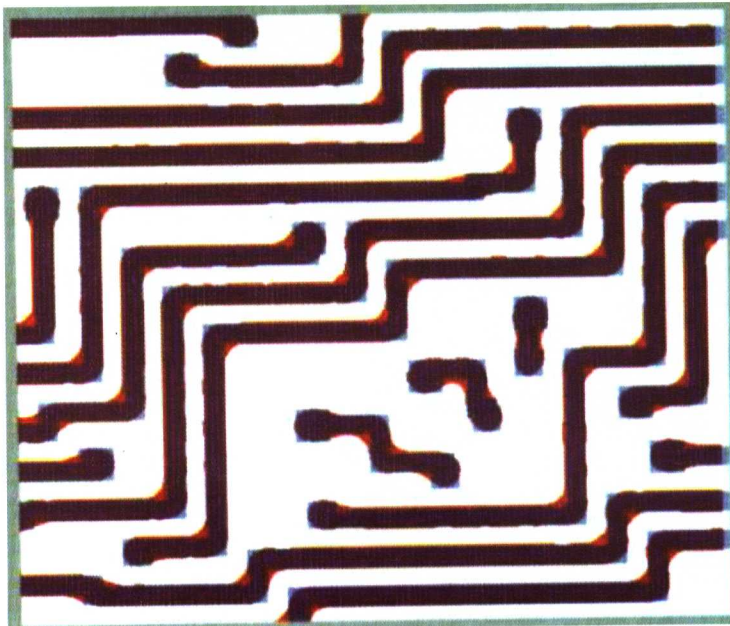
彩图3 由文件mdex8a中第559~562行给出的电子温度（源于 [4.2]）
（用于正文 §4.6.4.3）



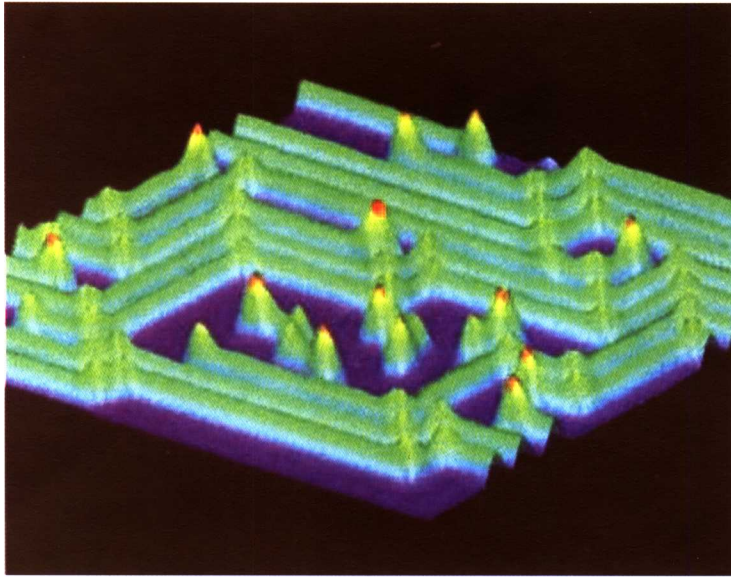
彩图4 说明相移掩模优于传统的透射掩模的DEPICT-2模拟（源于 [5.9]）
（用于正文 §5.1.2.2）



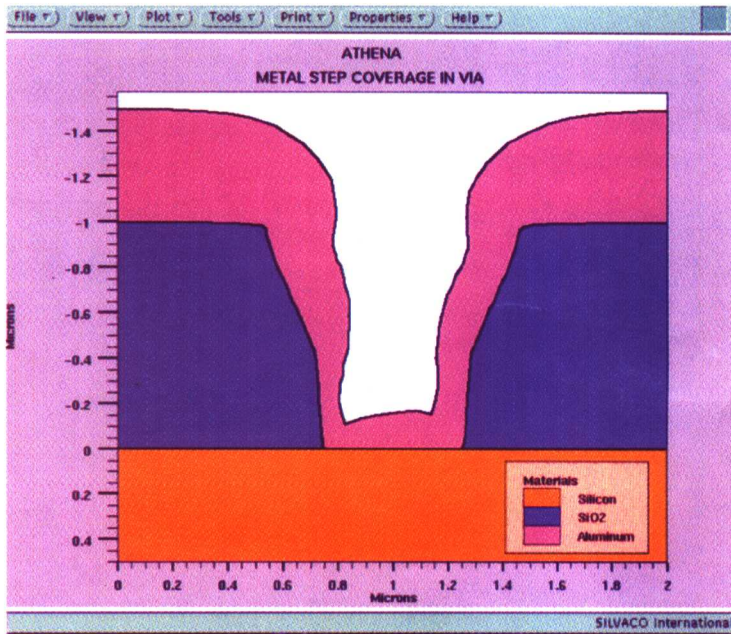
彩图5 相移掩模光刻胶表面图像的表面投影图（源于 [5.9] ）
（用于正文 § 5.1.2.2）



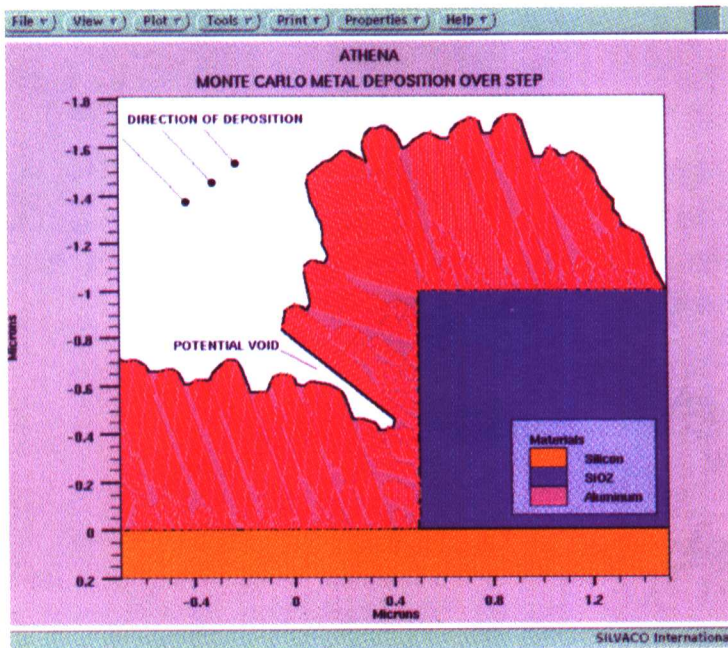
彩图6 用于图像质量快速定性度量的三维投影图（源于 [5.11] ）
（用于正文 § 5.1.2.2）



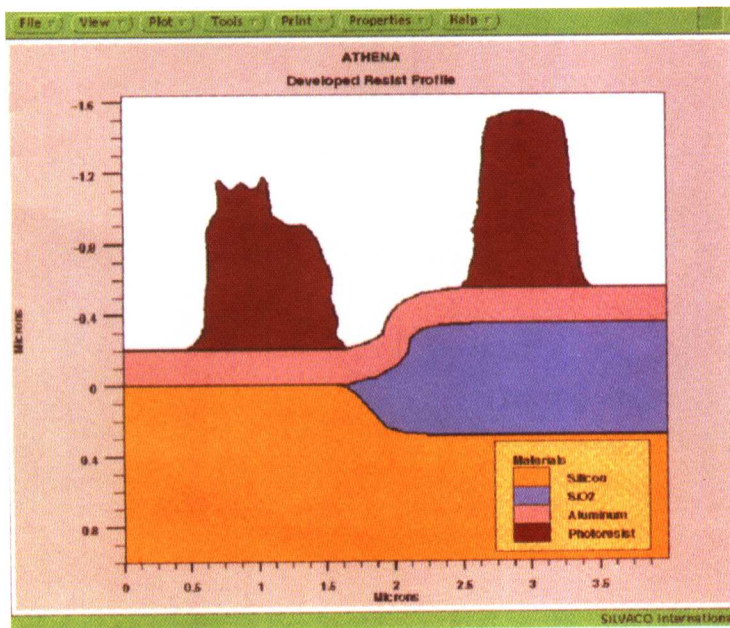
彩图7 用作显示原始设计掩模和印好图像间差别的DEPICT-4模拟结果（源于 [5.11] ）
（用于正文 § 5.1.2.2）



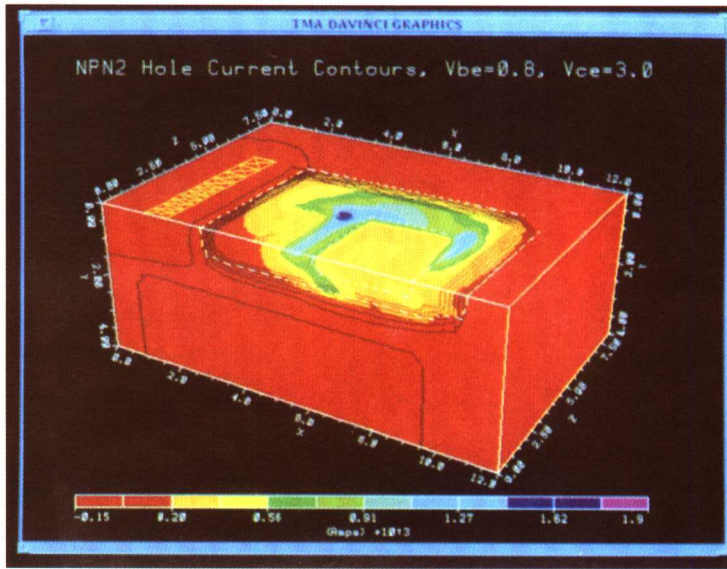
彩图8 通道（via）中金属阶跃覆盖的ELITE模拟结果（源于Silvaco公司产品介绍）
（用于正文 § 5.1.2.3）



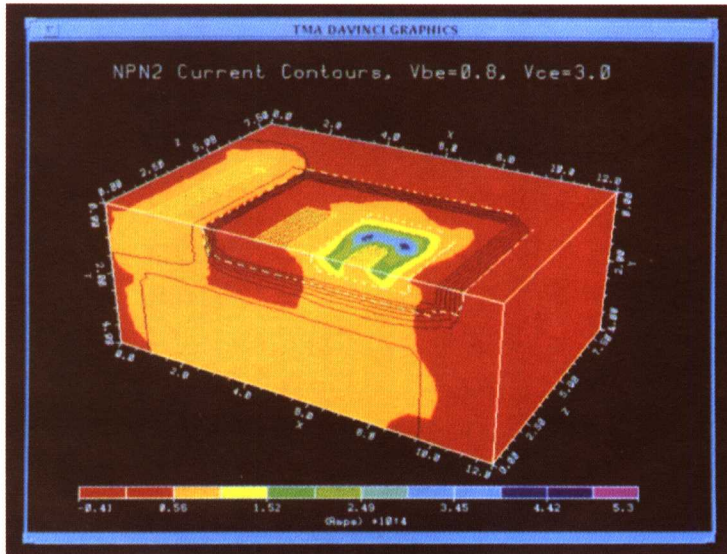
彩图9 阶跃金属淀积的蒙特卡洛模拟结果（源于Silvaco公司产品介绍）
（用于正文 § 5.1.2.3）



彩图10 非平面结构显影后光刻胶纵剖面轮廓图（源于Silvaco公司产品介绍）
（用于正文 § 5.1.2.4）



(a) 模拟得出的空穴电流密度三维轮廓图



(b) 模拟得出的电流密度三维轮廓图

彩图11 NPN管中电流密度非均匀的三维图示 (源于 [5.35])
(用于正文 §5.1.5)

前 言

自 1958 年 Jack S. Kilby 发明集成电路(IC)以及 1959 年 Robert N. Noyce 发明实用的硅 IC 以来,历经 50 余年的发展,IC 的功能和应用有了惊人的增强和扩展,2005 年全球基于 IC 的半导体产业产值已超过 2 200 亿美元,IC 已成为人类社会进入信息时代的主要物质基础。

集成电路工艺和器件的计算机模拟又称集成电路工艺和器件技术的计算机辅助设计(英文简称为 IC TCAD),它是 IC 设计和 IC 虚拟制造的重要组成部分,是 IC 工艺和器件特性快速分析的有力工具.应用 IC TCAD 能缩短 IC 工艺和器件的开发周期,节省试制成本,还能获取实验无法得到的信息以及深化 IC 工艺和器件的物理研究.

美国 Stanford 大学 IC 实验室 1978 年 IC 工艺模拟软件 SUPREM-2 的成功试制和释放使用,以及 1979 年半导体器件分析软件 SEDAN-1 的成功试制和释放使用是 IC TCAD 开始进入实用的标志. 20 世纪 80 年代至今的 20 多年中,随着 IC 工艺和器件物理研究的进展,计算机硬件性能的增强以及应用软件开发技术的成熟,IC TCAD 的功能和应用也有了同 IC 发展同步而得到显著的增强和扩展.

鉴于 IC TCAD 对 IC 研发和生产的重要作用,复旦大学从 1981 年引入 SUPREM-2 为起点开始了对该项技术的研究,并从 1988 年起为微电子及固态电子学专业的研究生开设了《集成电路工艺和器件的计算机模拟》专业课.本书是作者以该专业课自编讲义为基础,经较多的补充、修改,兼顾基础和近代进展写成的.本书用约 40%的篇幅详细介绍在国际上最早实用的、参考资料齐全的、特别适用于教学和入门学习的几种知名的经典的 IC 工艺和器件模拟程序所用的物理模型和程序使用方法,用约 60%的篇幅阐述 IC TCAD 的多方面发展及近代进展.

作者希望本书适合于大学在校有关专业的高年级本科生或研究生用作教科书或参考书,也希望本书对所有有兴趣于研发、使用 and 了解 IC TCAD 技术的广大

产、学、研界的读者有较大的参考作用。

作者衷心感谢本书相关的 IC TCAD 模型和软件的研制、开发和推广专家以及有关的大学和公司。本书引用了他们撰写的科研论文、研究报告、产品介绍、用户手册的部分内容和有关图表。作者相信部分材料的引用将使本书读者能有机会具体了解本领域一批专家和单位为 IC TCAD 的发明和发展作出的先驱性的贡献，也有利于读者享受由此而带来的本书教学价值和参考价值提升的效果。

最后，作者敬请同行专家和读者对本书存在的差错和不足提出意见，您的意见将是本书有机会再版时修改和补充的主要依据。

阮 刚

2006 年 9 月于复旦大学

* 鉴于本书的主体属集成电路计算机模拟、辅助设计，相关的物理量都采用正体字母，与一般出版惯例不同。

目 录

前言	1
第一章 引言	1
§ 1.1 模拟和集成电路模拟简释	1
1.1.1 模拟	1
1.1.2 集成电路模拟	1
§ 1.2 IC工艺和器件模拟简介	2
1.2.1 IC工艺模拟	2
1.2.2 IC器件模拟	4
§ 1.3 本书的内容安排及特点	5
第二章 集成电路的工艺模拟	7
§ 2.1 SUPREM 概述	7
§ 2.2 SUPREM-2 概述	8
§ 2.3 SUPREM-2 的工艺模型	8
2.3.1 离子注入模型	8
2.3.1.1 简单的对称高斯分布	9
2.3.1.2 两个相联的半高斯分布	10
2.3.1.3 修改过的 Pearson IV 分布	10
2.3.1.4 硅表面有二氧化硅层时对射程的修正	12
2.3.1.5 热退火对注入杂质分布的影响	12
2.3.2 热加工时杂质迁移模型	13
2.3.2.1 扩散方程	13
2.3.2.2 非本征情况下的扩散系数	15
2.3.2.3 硅中存在其他高浓度杂质时对杂质扩散分布的影响	17
2.3.2.4 磷的扩散迁移模型	18

2.3.2.5	氧化增强扩散	20
2.3.2.6	界面流量	21
2.3.2.7	产生和损失机构——砷的扩散迁移模型	23
2.3.3	热氧化模型	24
2.3.3.1	Deal-Grove 热氧化生长公式	24
2.3.3.2	高硅表面掺杂浓度对硅氧化速率的影响	25
2.3.3.3	增量形式的热氧化生长公式	26
2.3.4	硅外延模型	26
§ 2.4	SUPREM-2 中几个电参数的计算	27
2.4.1	薄层电阻计算	27
2.4.2	MOS 阈值电压计算	28
§ 2.5	SUPREM-2 的使用和应用例举	30
2.5.1	SUPREM-2 的使用	30
2.5.2	SUPREM-2 的应用例举	30
2.5.2.1	SUPREM-2 应用例举一 CMOS P 阱模拟	30
2.5.2.2	SUPREM-2 应用例举二 斯坦福配套元件芯片 工艺	35
§ 2.6	SUPREM-3	40
2.6.1	SUPREM-3 的离子注入模型	40
2.6.2	SUPREM-3 的热氧化模型	41
2.6.3	SUPREM-3 的杂质扩散模型	46
2.6.3.1	SUPREM-3 执行的非氧化情况下的杂质扩散 模型	46
2.6.3.2	SUPREM-3 执行的氧化表面情况下的杂质 扩散模型	50
2.6.3.3	SUPREM-3 执行的为其他材料的杂质扩散和 分凝模型	52
2.6.4	SUPREM-3 的硅外延模型	52
2.6.5	多晶硅模型	55

2.6.6 SUPREM-3 中的电性能计算	56
2.6.7 SUPREM-3 的使用和应用例举	58
2.6.7.1 SUPREM-3 的使用	58
2.6.7.2 SUPREM-3 的应用例举一 硅栅 NMOS 工艺	58
2.6.7.3 SUPREM-3 的应用例举二 掺杂多晶硅发射极 双极型晶体管	73
§ 2.7 SUPREM-4	87
2.7.1 SUPREM-4 的离子注入模型	88
2.7.1.1 解析离子注入模型	88
2.7.1.2 Monte Carlo 离子注入模型	89
2.7.2 SUPREM-4 的杂质扩散模型	89
2.7.3 SUPREM-4 的氧化模型	90
2.7.3.1 一维氧化模型	90
2.7.3.2 二维氧化模型	90
2.7.4 SUPREM-4 的其他工艺模型和电参数计算模型	94
2.7.5 SUPREM-4 的使用和应用例举	95
2.7.5.1 SUPREM-4 的使用	95
2.7.5.2 SUPREM-4 的应用例举一 硅的局部氧化工艺的 二维模拟	95
2.7.5.3 SUPREM-4 的应用例举二 CMOS 中 NMOS 管 的制造工艺模拟	98
第二章参考资料	104
第三章 半导体器件的一维模拟	108
§ 3.1 SEDAN-1 的一般描述	108
§ 3.2 SEDAN-1 执行的半导体基本方程	110
§ 3.3 SEDAN-1 中几个参数的物理模型	112
3.3.1 杂质浓度及电场对迁移率的影响	112
3.3.2 高掺杂浓度引起禁带变窄	113

3.3.3 两种复合机构对复合率的贡献	114
§ 3.4 SEDAN-1 的使用和应用例举	115
3.4.1 SEDAN-1 的使用	115
3.4.2 SEDAN-1 的应用例举	116
3.4.2.1 SEDAN-1 的输入文件例举	116
3.4.2.2 SEDAN-1 的输出信息例举	118
§ 3.5 SEDAN-3	121
3.5.1 SEDAN-3 概述	121
3.5.2 SEDAN-3 执行的基本方程	122
3.5.3 SEDAN-3 中几个参数的物理模型	126
3.5.3.1 硅中几个参数的物理模型	126
3.5.3.2 GaAs 和 $Al_xGa_{1-x}As$ 中几个参数的物理模型	130
3.5.4 SEDAN-3 的使用和应用例举	135
3.5.4.1 SEDAN-3 的使用	135
3.5.4.2 SEDAN-3 的应用例举一 MOS 电容的模拟	136
3.5.4.3 SEDAN-3 的应用例举二 npn 晶体管的模拟	138
3.5.4.4 SEDAN-3 的应用例举三 具有多晶硅发射区的 npn 晶体管的模拟	140
3.5.4.5 SEDAN-3 的应用例举四 $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs 异质结双极型晶体管的模拟	142
第三章参考资料	145
第四章 半导体器件的二维模拟	147
§ 4.1 MINIMOS-2 概述	147
§ 4.2 MINIMOS-2 执行的半导体方程组	148
§ 4.3 3 种求取二维掺杂分布的方法	150
§ 4.4 MINIMOS-2 中迁移率及产生和复合模型	152
4.4.1 迁移率模型	152
4.4.2 产生和复合模型	154