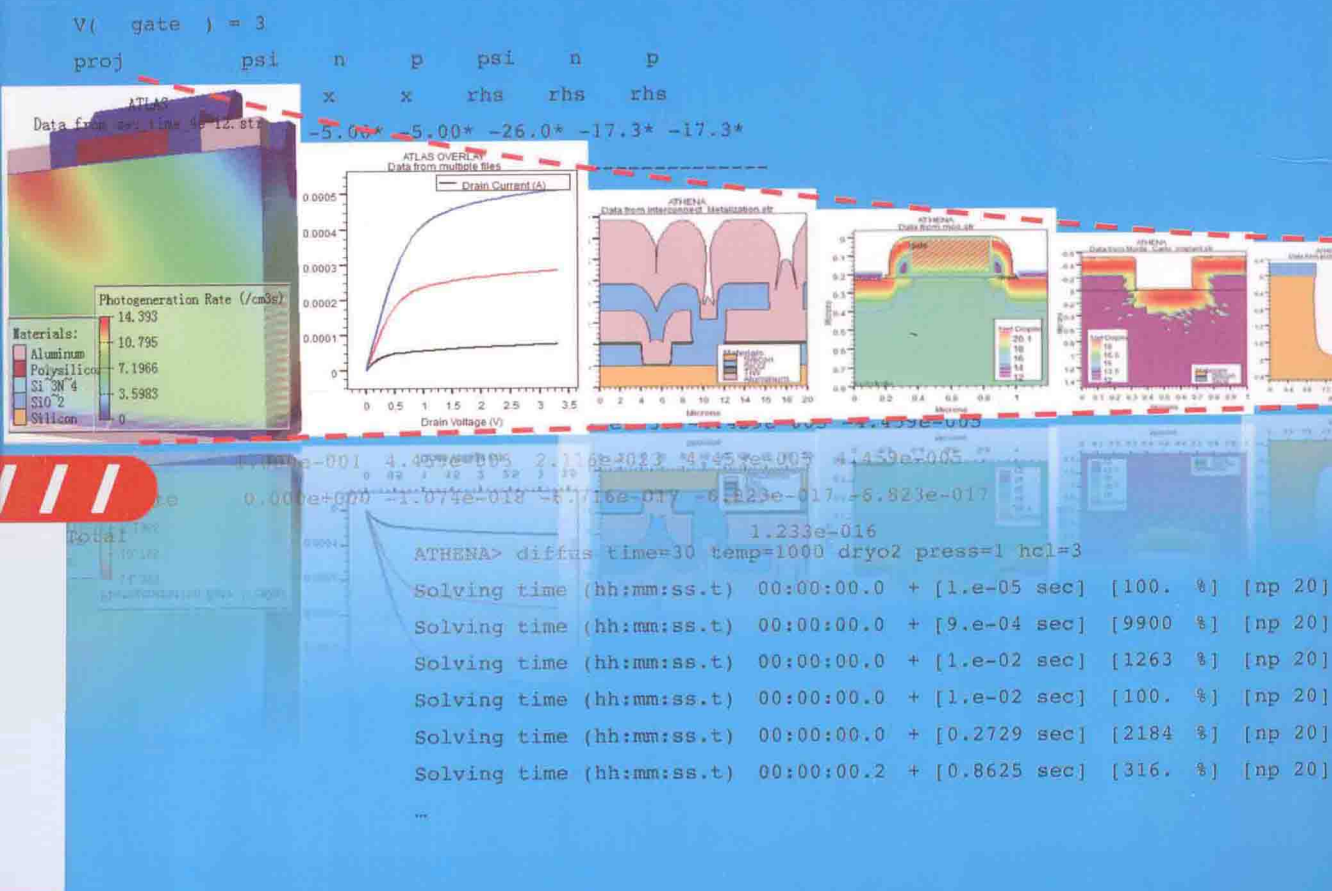


# 半导体工艺和器件仿真软件 Silvaco TCAD 实用教程

唐龙谷 编著



清华大学出版社

唐龙谷 编著

# 半导体工艺和器件仿真软件 Silvaco TCAD 实用教程

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

为了满足半导体工艺和器件及其相关领域人员对计算机仿真知识的需求,帮助其掌握当前先进的计算机仿真工具,特编写本书。本书以 Silvaco TCAD 2012 为背景,由浅入深、循序渐进地介绍了 Silvaco TCAD 器件仿真基本概念、Deckbuild 集成环境、Tonyplot 显示工具、ATHENA 工艺仿真、ALTAS 器件仿真、MixedMode 器件-电路混合仿真以及 C 注释器等高级工具。

本书内容丰富、层次分明、突出实用性,注重语法的学习,例句和配图非常丰富;所附光盘含有书中具有独立仿真功能的例句的完整程序、教学 PPT 和大量学习资料。读者借助本书的学习可以实现快速入门,且能深入理解 TCAD 的应用。

本书既可以作为高等学校微电子或电子科学与技术专业高年级本科生和研究生的教材,也可供相关专业的工程技术人员学习和参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体工艺和器件仿真软件 Silvaco TCAD 实用教程/唐龙谷编著.--北京:清华大学出版社,2014  
ISBN 978-7-302-35431-4

I. ①半… II. ①唐… III. ①半导体工艺—计算机仿真—教材 ②半导体器件—计算机仿真—教材 IV. ①TN305-39 ②TN303-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 023072 号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:唐龙谷

责任校对:赵丽敏

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.5 字 数:373 千字  
(附光盘 1 张)

版 次:2014 年 7 月第 1 版 印 次:2014 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

# 序言

FOREWORD



治理环境污染是一个发展中国家所要面对的重要难题,大力节约能源、加快建设资源节约型、环境友好型社会是我国的基本国策,也是我国经济转型升级的主要目标之一。我国是一个资源相对匮乏的人口大国,人均石油、煤炭可采储量分别仅为世界平均水平的 10% 和 57%,而每万元 GDP 的能耗是世界平均水平的 3 倍以上。要实现节能和绿色、环保,就离不开半导体技术的发展。

半导体技术的应用产生了大功率半导体器件和大规模集成电路,前者作为一个核心器件被广泛用于各种能量转换和传输装置中,在各种资源从其原始状态转化为可供人类实际应用的过程中起到助推器作用;后者更是被应用于人们的日常生活、工业自动化和国防安全等地球的各个角落。

半导体器件家族拥有众多成员,其中以硅基 CMOS 器件为基础的微电子技术主要用于信息的处理。微电子技术发展迅猛,摩尔定律提出的后数十年里集成电路的发展一直遵循着摩尔定律,而加工精度和物理“限制”的预言也一再被打破。微电子领域的技术突破除不断研发更为先进的加工手段,也越来越寻求在新材料和新的器件结构方面的革新。功率半导体器件是进行电能(功率)处理的半导体器件,是弱电控制与强电运行间的桥梁。每个电子产品均离不开功率半导体技术,功率半导体的目的是使电能更高效、更节能、更环保。目前 IGBT 是功率半导体器件的主流。半导体器件家族也包括其他光电器件、霍尔器件和热敏、压敏、微机电系统(MEMS)等器件。从材料的发展角度,第一代和第二代半导体材料的代表分别是硅和砷化镓,第三代半导体材料的代表是碳化硅和氮化镓。虽然硅器件在可预见的将来仍然是主流,但其他材料所具有的独特优势也将促使其不断发展。

随着技术的进步以至于趋近物理极限,半导体技术的发展越来越离不开先进的设计技术。半导体器件是非常精细、复杂的系统,涉及相当多的物理原理,精确预测器件特性需要求解多个相互耦合的半导体微分方程,物理量也非常多,对于二维或三维复杂结构求解就更加困难,最大的难度是很多半导体方程通常没有解析解,这就迫切需要借助先进的计算机仿真手段。Silvaco TCAD 是目前商用最成功的半导体工艺和器件的仿真软件之一,可以实现半导体器件的工艺仿真、器件特性仿真和小规模器件与电路的混合仿真,精确预测工艺结果、器件在二维/三维下的直流、交流和时域响应,预测器件的电学、热学和光学结果。Silvaco TCAD 也能仿真除硅之外的多种半导体材料,通过科学、系统的仿真实现优良的

设计。

半导体技术起源于国外,我国起步较晚,发展速度较慢,与国际先进水平仍存在较大差距,这体现在材料、工艺、制造装备、设计工具等诸多方面。随着国家实力的增强以及不容忽视的广大市场,我们能购买和使用世界最先进的半导体工艺和器件仿真软件,这是我们实现赶超的大好条件。很欣慰作者能够结合自身在半导体工艺和器件仿真领域钻研数年所取得的经验和成就,并乐于将他所积累的知识 and 经验系统地融入他的著作中,为我们编写了关于半导体工艺和器件仿真工具 Silvaco TCAD 的全面系统的学习教材,我热切希望能借此契机涌现越来越多的半导体器件设计英才,推动祖国的半导体事业更快更好的发展。

中国工程院院士



2014年1月

# 前言

FOREWORD



现代电子工业飞速发展,极大地改善了人们的生产和生活。半导体器件的持续改进、完善以及不断涌现的新器件促使电子工业加速发展,但激烈的竞争也让半导体行业倍感压力。由于技术更新快,设备和原材料的投入相当巨大,现在建立一条生产线动辄要数亿美元。对高技术人才的需求也是前所未有的。

对于半导体行业来说,时间是成本的一大组成,如何更早地将产品推向市场,是决定生存和发展的关键。如何缩短开发周期,以更低成本将产品推向市场呢?人们急切需要一种快速而有效的设计工具。得益于固体物理和半导体物理这些基础理论的成熟、经验数据的积累以及优化算法的发展,在半导体领域逐步开发出计算机仿真的方法,基于 TCAD 软件的计算机辅助设计进入了人们的视野,且由于计算机功能的增强,建立工作站的成本持续降低,使得 TCAD 软件得以快速发展。

经过二十多年的发展,来自硅谷的 Silvaco 公司的产品在 TCAD、参数提取、互连建模、模拟、数字和射频电路设计等半导体仿真设计领域获得了广泛应用。其中 TCAD 可以仿真半导体器件的电学、光学和热学行为,分析二维或三维器件的直流、交流和时域响应以及光电、电-光转换等特性,研究器件在电路中的行为,分析离子注入、扩散、氧化、刻蚀、淀积、光刻、外延、抛光和硅化物等工艺和工艺变动对器件特性的影响。Silvaco TCAD 功能非常全、易学易用,运算速度快,具有丰富的扩展功能,可有效应用于半导体器件的结构设计和工艺设计,并已成为半导体工艺和器件仿真领域的主要产品。

本书共 5 章。第 1 章主要介绍 TCAD 的基本概念、Silvaco TCAD 的特点、语法格式和集成环境 Deckbuild 的命令,为 Silvaco TCAD 学习和使用打下坚实基础。第 2 章主要介绍二维工艺仿真器 ATHENA 的使用,对各个单项工艺的仿真有详细的说明,最后介绍了优化工具的使用。第 3 章主要介绍二维器件仿真器 ATLAS 的使用,从器件结构生成、材料参数定义、物理模型定义、计算方法、特性获取到结果分析的仿真流程及常见的器件功能仿真都有详细讲解。第 4 章主要介绍器件-电路混合仿真的使用,以电路瞬态响应的仿真为重点,展开电路网表的描述、控制和电路分析状态、器件状态的详细讲解。第 5 章主要是一些高级功能的介绍,它们是用 C 注释器编辑的函数文件来描述材料参数、自定义材料、工艺校准、实验设计和优化功能。书中每个章节都提供了大量的示例来加强对仿真的理解和学习,全书示例总数超过 290 个。为了便于读者更直观地理解和掌握仿真技能,作者精心为本书配备了光盘,其中包括书中能实现完整仿真功能的示例、各章节的主要彩图、仿真软件的介绍

材料和用户手册、作者授课时制作的 PPT 等资料。

在 2009 年本书还只是在校学习交流的小册子,毕业后作者加入半导体器件研发企业,因此更能兼顾不同读者群的需求,也以此目的完善书中的内容和材料。几年来在老师、同学、领导和同事那里获得了非常多的帮助和启发,特别是株洲南车时代电气股份有限公司和电力电子器件湖南省重点实验室的领导和同事的支持和鼓励,使作者的认识水平不断加深,也促使书稿内容不断丰富和完善,作者非常感激他们,同时也真切地希望将所积累的经验 and 各位读者一起分享。基于此,本书的特点是由浅入深,循序渐进,关注语法的学习,注重引导和启发,讲解既包括整体方案和流程控制,又能深入到每一步细节。希望本书能带领各位读者进入 TCAD 仿真的殿堂,体验到半导体工艺和器件仿真的乐趣。

本书可以作为本科高年级和研究生的教材。科研工作者也可以此为参考工具,在器件和工艺的设计及验证上获得些许帮助。

感谢四川大学石瑞英教授和龚敏教授对作者的悉心教导,指引作者进入半导体工艺和器件仿真领域;感谢杨治美老师对全书做了认真仔细的校对以及提供部分习题;感谢株洲南车时代电气股份有限公司张明专家对书中内容编排和素材选取方面的指导。

谨以此书献给我辛勤劳作的父母,正是他们不言的教诲,使我一步步成长到今天。祝他们永远健康!快乐!幸福!

限于作者的水平,不足之处在所难免,敬请广大读者和用户批评指正。

编者

2014 年 1 月

# 目录

## CONTENTS



<b>第 1 章 仿真基础</b> .....	1
1.1 TCAD .....	1
1.1.1 数值计算.....	1
1.1.2 基于物理的计算.....	2
1.2 Silvaco TCAD .....	3
1.2.1 主要组件.....	4
1.2.2 目录结构.....	6
1.2.3 文件类型.....	7
1.3 Deckbuild .....	8
1.3.1 Deckbuild Preferences .....	9
1.3.2 语法格式 .....	13
1.3.3 go .....	14
1.3.4 set .....	14
1.3.5 Tonyplot .....	15
1.3.6 extract .....	25
1.4 学习方法.....	32
思考题与习题 .....	33
<b>第 2 章 二维工艺仿真</b> .....	34
2.1 ATHENA 概述 .....	34
2.2 工艺仿真流程.....	39
2.2.1 定义网格 .....	39
2.2.2 衬底初始化 .....	43
2.2.3 工艺步骤 .....	47
2.2.4 提取特性 .....	47
2.2.5 结构操作 .....	47
2.2.6 Tonyplot 显示 .....	48
2.3 单项工艺.....	48



2.3.1	离子注入 .....	49
2.3.2	扩散 .....	56
2.3.3	淀积 .....	59
2.3.4	刻蚀 .....	64
2.3.5	外延 .....	70
2.3.6	抛光 .....	71
2.3.7	光刻 .....	74
2.3.8	硅化物 .....	87
2.3.9	电极 .....	88
2.3.10	帮助 .....	89
2.4	集成工艺 .....	92
2.5	优化 .....	95
2.5.1	优化设置 .....	95
2.5.2	待优化参数 .....	96
2.5.3	优化目标 .....	96
2.5.4	优化结果 .....	97
	思考题与习题 .....	98
<b>第3章</b>	<b>二维器件仿真 .....</b>	<b>99</b>
3.1	ATLAS 概述 .....	99
3.2	器件仿真流程 .....	103
3.3	定义结构 .....	103
3.3.1	ATLAS 生成结构 .....	104
3.3.2	DevEdit 生成结构 .....	111
3.3.3	DevEdit 编辑已有结构 .....	117
3.4	材料参数及模型 .....	120
3.4.1	接触特性 .....	120
3.4.2	材料特性 .....	122
3.4.3	界面特性 .....	125
3.4.4	物理模型 .....	125
3.5	数值计算方法 .....	127
3.6	获取器件特性 .....	131
3.6.1	直流特性 .....	132
3.6.2	交流小信号特性 .....	137
3.6.3	瞬态特性 .....	138
3.6.4	高级特性 .....	140
3.7	圆柱对称结构 .....	159
3.8	器件仿真结果分析 .....	161
3.8.1	实时输出 .....	161
3.8.2	日志文件 .....	166

3.8.3	Deckbuild 提取 .....	167
3.8.4	Tonyplot 显示 .....	167
3.8.5	output 和 probe .....	167
	思考题与习题 .....	176
<b>第 4 章</b>	<b>器件-电路混合仿真 .....</b>	<b>177</b>
4.1	MixedMode 概述 .....	177
4.2	电路仿真流程 .....	179
4.3	MixedMode 的语法 .....	179
4.3.1	网表状态 .....	179
4.3.2	控制和电路分析状态 .....	181
4.3.3	瞬态参数 .....	185
4.4	电路仿真示例 .....	188
4.4.1	FRD 正向恢复仿真 .....	188
4.4.2	FRD 反向恢复仿真 .....	191
4.4.3	PIN 二极管的光响应仿真 .....	194
4.5	电路仿真结果分析 .....	197
4.5.1	结果输出形式 .....	197
4.5.2	结果分析 .....	199
	思考题与习题 .....	200
<b>第 5 章</b>	<b>高级特性 .....</b>	<b>201</b>
5.1	C 注释器 .....	201
5.2	自定义材料 .....	203
5.2.1	材料类型 .....	203
5.2.2	自定义材料 .....	204
5.3	工艺参数校准 .....	205
5.4	DBinternal .....	208
5.4.1	Template 文件 .....	208
5.4.2	Experiment 文件 .....	209
5.4.3	DBinternal 命令 .....	211
5.5	VWF .....	212
5.5.1	DOE .....	213
5.5.2	优化 .....	221
5.6	三维仿真 .....	224
5.6.1	ATLAS3D .....	224
5.6.2	Tonyplot3D .....	227
5.6.3	VictoryCell .....	229
	思考题与习题 .....	235
	<b>参考文献 .....</b>	<b>236</b>



## 仿 真 基 础

Silvaco 产品涵盖半导体仿真相当广泛的领域,主要的产品有 TCAD、Analog/AMS/RF、Custom IC CAD、Interconnect Modeling 和 Digital CAD。Silvaco TCAD 可以仿真半导体工艺和器件特性,其主要的集成环境为 Deckbuild,工艺仿真器、器件仿真器以及可视化工具等模块均可在 Deckbuild 界面灵活地调用。Silvaco TCAD 有 Linux 版本,也有 Windows 版本。在 Linux 版本下有更多的图形用户界面(GUI),方便用户选择参数,然后自动转化成相应的语句,而 Windows 版本则需要书写语句。对于这两种方式每个人都会有自己的喜好,但一般倾向于图形化界面,作者在开始接触 Silvaco TCAD 的时候也是如此。但图形化界面也有不足的地方,容易使人产生依赖,即用惯了图形化界面来选择参数就不会特别在意语法的学习,而且图形界面并没有包含所有参数。如果使用写语句的方式来组织仿真,则更有利于全面、透彻地理解和掌握,所以作者建议初学者学习 Silvaco TCAD 时应首先从语法学习着手,因此本书以 Windows 版本下的 Silvaco TCAD 为主,但有时为便于说明也会采用一些 Linux 版本中的图形界面。

本章主要介绍 Silvaco TCAD 的基本框架,集成环境 Deckbuild,Deckbuild 的命令“extract”、“go”、“set”和“Tonyplot”以及 Silvaco 文档的分布和学习方法。

### 1.1 TCAD

TCAD 是 Technology Computer Aided Design 的缩写,指半导体工艺仿真以及器件仿真工具。商用的 TCAD 工具有 Silvaco 公司的 ATHENA 和 ATLAS, Synopsys 公司的 TSuprem 和 Medici 以及 ISE 公司(已经被 Synopsys 公司收购)的 Dios 和 Dessis。Synopsys 公司最新发布的 TCAD 工具命名为 Sentaurus。在光电器件仿真领域不得不提到的另外一个 TCAD 软件是 Crosslight。

#### 1.1.1 数值计算

计算机仿真必须基于数值计算。Silvaco TCAD 中的数值计算是基于一系列的物理模型及其方程的,这些方程以已经成熟的固体物理和半导体物理理论或者是一些经验公式为基础。Silvaco TCAD 提供灵活的方式来设置方程的量,它们可以设置为定值,如  $\mu_n =$

$1200\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{S})$ ；也可以用自定义函数来描述，这需要 C 注释器编写相应的函数表达式文件；如果有相应物理模型来描述参数的话，则参数是由另一些模型方程计算得到的（如模型 conmob 为迁移率随掺杂浓度变化的模型）。3.5 节数值计算方法中将提到解耦合方程以及相应的迭代和初始猜测策略。实际的物理系统非常复杂，连续系统的信息量也巨大到无法估量，必须将其离散化，那么自然的半导体仿真应用上就基于网格计算。

网格计算是将半导体仿真区域划分成网格，在网格点处计算出希望得到的特性（如电学性质、光学性质、工艺步骤的速率等）。网格划分对仿真至关重要，精细的网格能得到较精确的结果，但将增加计算时间。网格点是计算中很重要的资源，要合理地利用。

Silvaco TCAD 有多种方式可以灵活地控制网格：

(1) 由网格线以及网格线之间的间距来描述仿真区域的网格。

(2) 通过网格释放来使后续步骤中不是很紧要的区域的网格点变少，网格释放之后也可以再重新建立合适的精细的网格。

(3) 用三角形参数来控制网格的长宽比。如果将矩形网格的对角线相连，则可以形成两个三角形，控制三角形的角度就可控制网格的长宽比。

(4) 在适当的区域增删网格线。

数值计算必须综合考虑精确性、计算速度和收敛性。精确性与网格密度、计算时的步长疏密、算法和物理模型的选择等有关。计算速度由网格密度、计算步长的疏密以及算法等决定。收敛性与计算步长的疏密、初始值以及算法有关。仿真计算时参数设置上需要在精确性、计算速度和收敛性之间取得折中。网格划分与计算的精确性、计算速度和收敛性直接相关，在仿真计算时需要尤其注意，而初学者往往忽略这最重要的一点。Silvaco 中的网格点总数<sup>①</sup>是有限制的，在仿真时要合理利用这一资源。

### 1.1.2 基于物理的计算

仿真的精确性与选择的物理模型相关。基于物理的计算是指在仿真计算时采用的方程是有物理意义的，在不同的应用场合使用不同的物理模型。通常 Silvaco 的仿真思路和采用的模型是基于成熟的成果，这些成果通常发表在 IEEE 上。Silvaco 采用这些成果并打造成 Silvaco library。

器件仿真时主要用到的物理模型和方程如下：

(1) 基本半导体方程：泊松方程，载流子连续性方程，传输方程（漂移-扩散传输模型和能量平衡传输模型），位移电流方程，……

(2) 载流子统计的基本理论：费米-狄拉克统计理论，玻耳兹曼统计理论，状态有效密度理论，能带理论，禁带变窄理论，……

(3) 不完全电离（低温仿真或重掺杂），缺陷或陷阱造成的空间电荷理论，……

(4) 边界物理：欧姆接触，肖特基接触，浮接触，电流边界，绝缘体接触，上拉元件接触，分布电阻接触，能量平衡边界，……

(5) 物理模型：迁移率模型，载流子生成-复合模型，碰撞电离模型，带-带隧穿模型，栅电流模型，器件级的可靠性模型，铁电体介电常数模型，外延应力模型，压力影响硅带隙模

<sup>①</sup> 二维 ATLAS 仿真中网格点上限是 10 万个，三维仿真的网格点上限是 4000 万个。

型,应力硅电场迁移率模型,纤锌矿材料极化模型,……

(6) 光电子模型:生成-复合模型,增益模型,光学指数模型,……

(7) 磁场下载流子传输模型,……

(8) 各向异性介电常数模型,……

(9) 单粒子翻转模型,……

器件仿真的通用框架是泊松方程和连续性方程。其中  $J_n$ 、 $J_p$ 、 $G_n$ 、 $G_p$ 、 $R_n$ 、 $R_p$ 、迁移率、载流子浓度、禁带变窄、少子寿命和光生成速率等参数都有专门的模型来定义。不同的模型表达式会有差别。将基本方程中的量去耦<sup>①</sup>,然后用相应的模型求出这些量,再代入方程进行计算。

电流密度方程和电荷传输模型通常采用玻耳兹曼近似。这些由不同的传输模型,如漂移-扩散模型、能量平衡传输模型和水力学模型等决定。电荷传输模型主要受所选的生成-复合模型的影响。电荷传输模型和生成-复合模型使用一些和载流子统计相关的概念。

ATLAS 手册中物理部分对物理模型有详细的描述。

## 1.2 Silvaco TCAD

Silvaco 名称是由三部分组成的,即“Sil”、“va”和“co”,从字面意思上不难理解到是“硅”、“谷”和“公司”英文单词的前几个字母的组合。Silvaco 的中文名称为矽谷科技公司。

来自美国的矽谷科技公司(Silvaco 公司)经过 20 多年的成长与发展,现已成为众多领域卓有建树的 EDA 公司,具有包括 TCAD 工艺和器件模拟、SPICE 参数提取、高速精确电路仿真、全定制 IC 设计与验证等功能。

Silvaco 拥有包括芯片厂、晶圆厂、IC 设计企业、IC 材料业者、ASIC 业者、大学和研究中心等在内的庞大的客户群。如今,Silvaco 已在全球设立多家分公司以提供更好的客户服务和合作机会。

Silvaco 是现今市场上唯一能够提供给 Foundry(芯片代工厂)最完整的解决方案和 IC 软件的厂商。提供 TCAD、Modeling 以及 EDA 前端和后端的支持,也能提供完整的 Analog Design Flow 给 IC 设计业者。产品 SmartSpice 是当今公认的模拟软件的黄金标准,因为支持多集成 CPU 的 SmartSpice 的仿真速度比起同类型软件更好,它是国外模拟设计师的最爱;SmartSpice 的收敛性也被公认为仿真器中最好的。Silvaco 还有其他整套流程包括版图工具以及验证工具。许多世界知名 Foundry 包括台积电、联电、Jazz 和 X-FAB 都与 Silvaco 有 PDK 的合作。

Silvaco 公司在 2006 年正式进入中国市场,希望凭借在国外超过 20 年的经验提供给国内 Foundry 最佳的解决方案。Silvaco 公司是现今市场上唯一能够提供整套包括建模、TCAD、模拟软件以及 PDK 方案的 EDA 公司。

从图 1.1 中也可看出 Silvaco 的产品覆盖了半导体产业相当广泛的领域。这也是本书将标题定为半导体仿真软件的原因。

<sup>①</sup> 在器件仿真部分介绍计算方法时将提到变量去耦合。

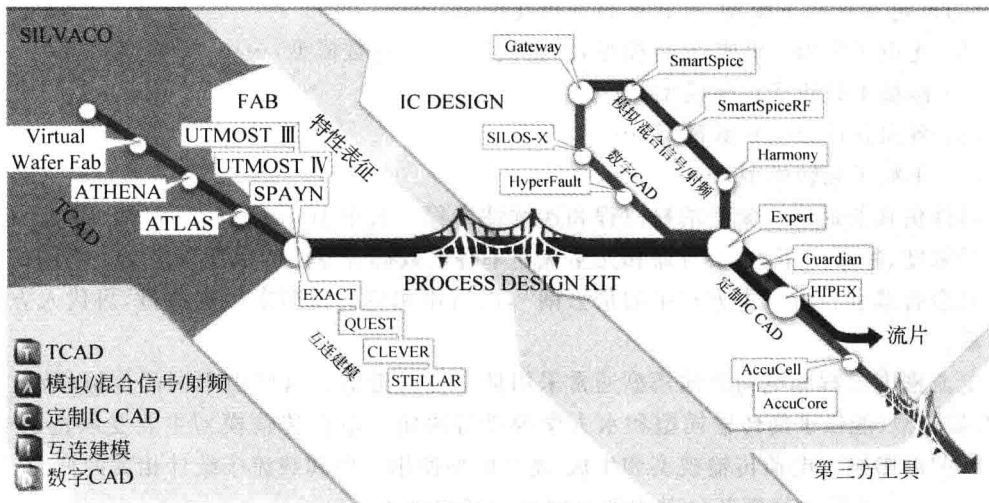


图 1.1 Silvaco 产品分布图

### 1.2.1 主要组件

Silvaco TCAD 的功能有一维、二维和三维工艺仿真，二维和三维器件仿真。主要的仿真功能及相应模块如下：

- 工艺仿真
  - 3D——Victory Process, Victory Cell
  - 2D——ATHENA, SSuprem4, MC Implant, Elite, MC Deposit/Etch, Optolith
  - 1D——ATHENA 1D, SSuprem3
- 器件仿真
  - 3D——Victory Device, Device 3D, Giga3D, Luminous3D, Quantum3D, TFT3D, Magnetic3D, Thermal3D, MixedMode3D
  - 2D——ATLAS, S-pisces, Blaze, MC Device, Giga, MixedMode, Quantum, Ferro, Magnetic, TFT, LED, Luminous, Laser, VCSEL, Organic Display, Organic Solar, Noise, Mercury
- 交互式工具
  - Deckbuild, Maskviews, DevEdit, Tonyplot, Tonyplot3D
- Virtual Wafer Fab

Silvaco TCAD 的主要组件包括交互式工具 Deckbuild、Tonyplot，二维工艺仿真器 ATHENA、二维器件仿真器 ATLAS、器件编辑器 DevEdit 和三维仿真器 Victory，此外还有一些内部的模块。

#### 1. Deckbuild

各 TCAD 仿真组件均可在集成环境 Deckbuild 的界面灵活调用，例如先由 ATHENA 或 DevEdit 生成器件结构，再由 ATLAS 对器件特性或器件-电路混合特性进行仿真，最后

由 Tonyplot 或 Tonyplot3D 显示输出。

Deckbuild 的特性功能如下：

- 输入和编辑仿真文件；
- 查看仿真输出并对其进行控制；
- 提供仿真器间的自动转换；
- 提供工艺优化以快速而准确地获得仿真参数；
- 内建的提取功能对仿真得到的特性进行提取；
- 内建的显示提供对结构的图像输出；
- 可从器件仿真的结果中提取对应 SPICE 模型的参数。

Silvaco 仿真流程如图 1.2 所示,由工艺仿真器或器件编辑器得到器件结构,然后通过器件仿真器求解相应的特性,结果由可视化工具 Tonyplot 显示出来或显示在实时输出窗口。命令文件的输入和各仿真器的调用都是在集成环境 Deckbuild 中完成的。

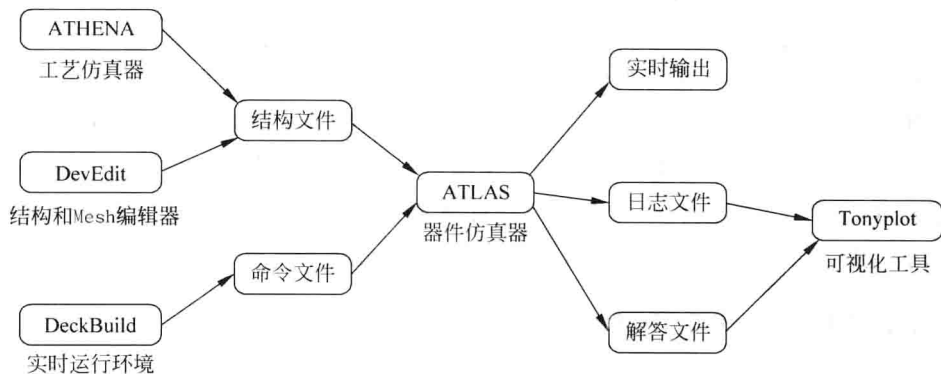


图 1.2 Silvaco 仿真流程图

## 2. Tonyplot 可视化工具

Tonyplot 用于对结构的显示,结构包括一维、二维结构,三维结构的显示需要使用 Tonyplot3D。Tonyplot 可显示的类型非常丰富,包括几何结构和物理量的分布等,也可以显示器件仿真所得到的曲线。

Tonyplot 可以将显示结果导出图片,也可将结构中的物理量的分布导出成数据文件,这样就能清楚地获取仿真的结果数据,以便采用其他绘图软件进行处理。Tonyplot 还提供动画制作等功能,支持将各步工艺的图像结果制作成动画以观察工艺的动态效果。

1.3.5 节将详细介绍 Tonyplot, Tonyplot3D 将在 5.6.2 节进行介绍。

## 3. ATHENA

工艺仿真器 ATHENA 能帮助工艺开发和优化半导体制造工艺。ATHENA 提供一个易于使用、模块化的、可扩展的平台。ATHENA 能对所有关键制造步骤(离子注入、扩散、刻蚀、淀积、光刻以及氧化等)进行快速精确的模拟。仿真能得到包括 CMOS、Bipolar、SiGe、SOI、III-V、光电子以及功率器件等器件的结构,并精确预测器件结构中的几何参数、掺杂分布和应力等。优化设计参数使速度、产量、击穿、泄漏电流和可靠性达到最佳结合。

它通过模拟取代了耗费成本的硅片实验,可缩短开发周期和提高成品率。

ATHENA 工艺仿真软件的主要模块有:SSuprem、二维硅工艺仿真器、蒙特卡洛注入仿真器、硅化物仿真模块、精英淀积和刻蚀仿真器、蒙特卡洛淀积和刻蚀仿真器、先进的闪存材料工艺仿真器和光电印刷仿真器。相应的工艺步骤仿真将在第 2 章详细介绍。

#### 4. ATLAS

ATLAS 器件仿真器可以模拟半导体器件的电学、光学和热学行为。ATLAS 提供一个基于物理的、使用简便的、模块化的、可扩展的平台,用以分析所有二维和三维模式下半导体器件的直流、交流和时域响应。

ATLAS 可以仿真硅化物、III-V、II-VI、IV-IV 或聚合/有机物等各种材料。可以仿真的器件类型很多,如 CMOS、双极、高压功率、VCSEL、TFT、光电子、激光、LED、CCD、传感器、熔丝、铁电材料、NVM、SOI、HEMT、Fin 和 HBT 等器件。

ATLAS 器件仿真器的主要模块有 S-Pisces(二维硅器件模拟器)、Device3D(三维硅器件模拟器)、Blaze2D/3D(高级材料的二维/三维器件模拟器)、TFT2D/3D(无定型和多晶体二维/三维模拟器)、VCSELS 模拟器、Laser(半导体激光二极管模拟器)、Luminous2D/3D(光电子器件模块)、Ferro(铁电场相关的介电常数模拟器)、Quantum(二维/三维量子效应模拟模块)、Giga2D/3D(二维/三维非等温器件模拟模块)、NOISE(半导体噪声模拟模块)、ATLAS C 注释器模块和 MixedMode(二维/三维组合器件和电路仿真模块)等。

#### 5. 器件编辑器 DevEdit2D/3D

器件编辑器 DevEdit2D/3D 可以编辑器件结构。器件编辑器有很多优点,如器件编辑器中的“区域”是由一系列特定位置的“点”构成的,因此器件结构的轮廓可以很灵活地控制。器件编辑器还可以在工艺仿真得到的结构基础上进行编辑,如重新划分网格;将 ATHENA 生成的二维剖面往 Z 方向扩展,得到三维结构。另外,器件编辑器在定义复杂电极(如通孔)时较 ATHENA 和 ATLAS 方便。器件编辑器的使用将在器件特性仿真的结构定义部分讲解。

#### 6. 掩膜输出编辑器

Maskviews Layout Editor 可以编辑掩膜结构,以便光刻等后续工艺中采用。Maskviews 有图形化界面。掩膜结构也可以用 layout 命令生成。三维工艺仿真是由掩膜驱动的,即工艺之前先定义采用的掩膜中的某一层,然后再开始工艺步骤。

掩膜编辑器将在 2.3.7 节进行介绍,在 5.6.3 节部分也有说明。

### 1.2.2 目录结构

在仿真之前需要先熟悉 Silvaco 的架构。此前介绍的只是 TCAD 的一些概念以及 Silvaco 各仿真模块的特性,接下来介绍软件使用的信息,如文件分布、文件类型等。

以 Windows 下的版本为例,目录结构的样式如下:



X:\ sedatools

- |— Doc(程序安装以及 sflm<sup>①</sup> 说明文档)
- |— exe(可执行程序的快捷方式)
- |— Shortcuts(程序控制及主要仿真环境的快捷方式)
- |— lib(组件库)
  - |— athena(二维工艺仿真器)
    - |— 5.20.0.R(版本号)
      - |— common(包含模型文件、模板、材料参数等)
      - |— docs(用户手册及组件更新的说明文档)
      - |— notes(各版本的新特性说明文档)
      - x86-nt(应用程序和环境)
  - |— atlas(二维器件仿真器)
  - |— Deckbuild
  - |— Tonyplot
  - |— tonyplot3d
  - |— ssuprem3
  - |— devedit
  - |— Maskviews
  - |— rpc. sflmserverd
  - ...
- |— examples(示例库)
  - |— athenald(工艺仿真的子示例库)
  - |— athena\_adaptmesh
  - |— athena\_diffusion
  - |— athena\_implant
  - |— bjt
  - |— diode
  - |— mos1
  - |— optoelectronics
  - |— power
  - ...

### 1.2.3 文件类型

仿真时需要熟悉 Silvaco 的文件系统, Silvaco TCAD 的主要文件类型有:

- (1) 输入文件(\*.in): Deckbuild 集成环境的仿真输入文件;
- (2) 结构文件(\*.str): 工艺仿真或器件编辑器得到的器件结构;
- (3) 器件仿真结果文件(\*.log): 器件仿真时存储仿真曲线数据;
- (4) 设置文件(\*.set): Tonyplot 的显示设置;

<sup>①</sup> standard floating license manager, license 管理器。