



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

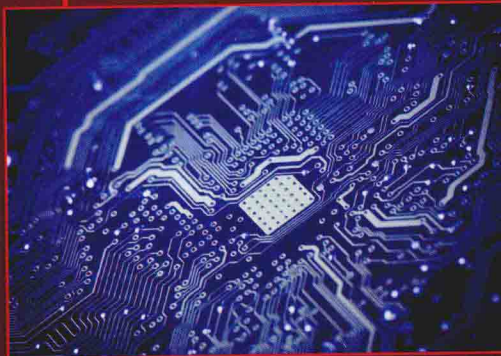
# ESD物理与器件

ESD: Physics and Devices

(美) Steven H. Voldman 著

雷鑑铭 邹志革 刘志伟 邹雪城 等译

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# ESD 物理与器件

(美) Steven H. Voldman 著  
雷鑑铭 邹志革 刘志伟 邹雪城 等译



机械工业出版社

本书系统地介绍了静电放电 (ESD) 物理理论及器件设计, 并给出了大量实例, 将 ESD 理论工程化。本书主要内容有: ESD 中的静电及热电物理学理论及模型, ESD 用半导体器件物理及结构, ESD 中衬底、阱、隔离结构, 电介质、互连及 SOI 等相关技术及应用。

本书为作者的 ESD 系列专著的第一本, 对于专业模拟集成电路及射频集成电路设计工程师, 以及系统 ESD 工程师具有较高的参考价值。本书可以作为电路设计、工艺、质量、可靠性和误差分析工程师的工具书, 也可以作为电子科学与技术、微电子科学与工程和集成电路设计, 尤其是模拟集成电路设计及射频集成电路设计专业高年级本科生及研究生的参考书。

Copyright©2004, John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled <ESD: Physics and Devices >, ISBN <978-0-470-84753-4 >, by <Steven H. Voldman >, Published by John Wiley & Sons, Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01-2012-8914 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

ESD 物理与器件/ (美) 沃尔德曼 (Voldman, S. H.) 著; 雷鑑铭等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 7

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: ESD: physics and devices

ISBN 978-7-111-47139-4

I. ①E… II. ①沃…②雷… III. ①芯片-静电防护  
IV. ①TN430. 2

中国版本图书馆CIP数据核字 (2014) 第 136140 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

版式设计: 霍永明 责任校对: 肖琳

封面设计: 马精明 责任印制: 李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 19.25 印张 · 405 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47139-4

定价: 88.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面防伪标均为盗版



## 作者简介

Steven H. Voldman 博士于 1979 年在巴法罗大学获得工学学士学位；1981 年在麻省理工学院获得电气工程硕士学位；在 IBM 公司实习项目的帮助下，于 1986 年在佛蒙特大学获得工程物理硕士，1991 年获得博士学位。在麻省理工学院，他是等离子体聚变中心和高电压研究实验室（HVRL）的成员。在 IBM 公司，他作为可靠性/器件工程师在双极型/CMOS SRAM 的  $\alpha$  粒子和宇宙射线 SER 仿真方面进行了原创性的工作，同时在栅致漏电（GIDL）机制、热电子、外延/阱设计、CMOS 闩锁和 ESD 等方面展开了研究。自 1986 年以来，他负责为 IBM 公司制定 CMOS、SOI、BiCMOS、RF CMOS 和 SiGe 工艺的 ESD/闩锁策略。在等比例缩小 MOSFET、器件仿真、铜互连、低介电系数、磁阻式磁头、CMOS、SOI、SiGe 和 SiGeC 技术等领域，他出版了 ESD 和闩锁方面的著作。Voldman 为 SEMATECH（美国半导体行业技术联盟）ESD 工作组的主席（1996—2000 年），ESD 联合技术组成员主席，ESDA（电子系统设计自动化）理事会、国际可靠性物理（IRPS）ESD/闩锁分委员会主席，国际物理与失效分析（IPFA）研讨会 ESD 分委员会主席，ESD 学会的传输线脉冲测试标准发展会议主席，ESD 国际教育委员会主席，并且服务于 ISQED 委员会、中国台湾 ESD 会议（T-ESDC）程序委员会。在美国、新加坡、马来西亚、中国台湾和中国大陆，Voldman 给许多大学及科研院所开设了 ESD 讲座。他拥有超过 125 项美国专利，超过 100 本出版物。在“EE Times”、“Intellectual Property Law and Business”两家网站他的知名度很高。在《Scientific American》（2002 年 10 月）他撰写了有关 ESD 现象的第一篇文章“Lightning Rods for Nanostructures”，并且同时发表在《Pour La Science》、《Le Scienze》和《Swiat Nauk》的国际版上。2003 年为表彰其在 CMOS、SOI 和 SiGe 静电保护方面所做的贡献，Voldman 博士成为第一个研究半导体 ESD 现象的 IEEE 会士。

# 译 者 序

本书译自美国 Steven H. Voldman 编写的《ESD Physics and Devices》一书。ESD (Electrostatic Discharge, 静电放电) 是当今集成电路设计与应用中重要的可靠性问题之一。本书系统地介绍了 ESD 物理理论及器件设计, 并给出了大量实例, 将 ESD 理论工程化。本书既总结了已有的文献资料中相关 ESD 物理学及器件知识, 又是一本自成体系的、理论性及实践性较强的专著。

本书内容深入浅出, 非常注重理论联系实践, 提供了大量的 ESD 器件设计实例。本书是 ESD 物理原理分析及器件研究与设计的理想教材, 可作为电路设计、工艺、质量、可靠性和误差分析工程师的工具书, 也可以作为电子科学与技术、微电子科学与工程和集成电路设计, 尤其是模拟集成电路设计及射频集成电路设计专业高年级本科生及研究生的参考书。本书由雷鑑铭负责组织并完成全书翻译工作, 参与本书翻译工作的还有华中科技大学邹雪城教授、邹志革副教授及电子科技大学刘志伟副教授, 以及华中科技大学的王真、李智、黄迪、陈小梅、李金山、袁桂毅、郭君辉、王翔宇、王午悦、胡贝贝及蔡湧达等。在此表示感谢。特别感谢华中科技大学文华学院外国语学院英语系肖艳梅老师的审校。

由于本书涉及的专业面较广, 加之译者水平有限, 书中难免有不妥及错误之处, 真诚希望广大读者批评指正, 在此表示衷心的感谢。

译者

2013 年 12 月于华中科技大学

# 前 言

自从米利都学派的创始人——泰勒斯在大约公元前 600 年发现琥珀对干草的引力时，人类就已经认识了静电放电（ESD）现象。2600 多年过去了，为了对静电学和 ESD 现象有更好地理解，探索仍在继续。如今，微电子制造行业包括制造厂区、制造装备、半导体材料以及微电子产业等都在持续关注静电现象。

本书的编著不仅是对 ESD 科学认知的探索，同样也是这个专业方向在被传承和学习的道路上前行的努力。目前，世界上只有一门大学课程开设一个学期来讲授半导体器件中 ESD 现象的规律。现在，关于如何在大学里培养和教育工程师们去学习半导体器件中的 ESD 保护，从而建立一个 ESD 课程体系，我们遇到了困境。至今，ESD 只是在个人讲座、短期课程和专题报告中可以学到。我们可以找到这方面的书籍，但是它们并非从培养通才的角度来搭建内容框架，无法激发学生对材料和半导体领域的广泛兴趣，因此，并不适合于物理学、数学、材料学专业或者电气工程专业的正规全日制研究生或者本科生阅读。

除非从跨学科的角度或者作为一系列强关联交叉学科来讲解，从而自最初的原理来建立理解，否则 ESD 现象的本质决定了它会成为一个极难讲授的课题。20 世纪 60 年代早期半导体集成电路的讲授面临着相同的困境，半导体电子学教育委员会（SEEC）应运而生，它强调如何在固体物理、器件和电路被分开讲授的大环境下培养集成电路工程师。在 SEEC 系列的前言中如是陈述：电子电路的微型化、小型化已经模糊了设备和电路的分界线，因此对于我们来说，深入理解器件物理和结构的关系及其对电路性能的潜在影响变得尤为重要。在这种重要关口，我们要主动创建一套半导体丛书，系统阐述对半导体基本原理和电路的理解，整套书内容由浅入深，衔接紧密。ESD 学科面临着同样的困境，也是一个棘手的难题，即因为工程师必须同时应对器件、电路、封装、系统和电气、热动及机械等各种问题。除此之外，时间尺度响应随着相互作用的规模和静电现象自身的改变而改变。

在半导体行业，对 ESD 现象的感知被视作一个“黑匣子”，似乎在技术成就的背后缺乏理解或教育的基础。ESD 工程师被当作半导体炼金术师：他们能够提供解决方案，但却不能从根本上理解或解释这些成果。大多数成果都是随机或通过非系统的实验流程取得的。ESD 工程师利用他们的教育背景、在职学习和直觉而非适当的工具来取得成果。

以我个人的经验，尽管工程师和管理人员对 ESD 学科缺乏信心，但是仍然需要经营业务、设计并生产销售产品。这使我意识到，过去 ESD 领域没有被科学化和结构化，在 ESD 学科所取得的进步缺乏坚实的基础。有一个共识是：ESD 专业方向不

## VI ESD 物理与器件

是一门学科。我觉得之所以有这种看法，一个原因是缺乏结构化的教育体系；另一个原因是由于缺乏通用的设计经验、常用的测试结构、标准化及标志性技术，以及 ESD 技术发展路线图。战略规划缺乏既因为缺乏战略思维，同时也因为缺乏预测能力，甚至缺乏预测 ESD 前景的信心和半导体工艺缩放的指导。工程师们甚至不相信工艺缩放和 ESD 发展趋势之间的关系。这些现象使我意识到，我们缺乏将 ESD 技术体系化或科学化的信心——这再次证明了我们对于 ESD 缺乏深入理解，ESD 没有与其他学科形成交叉。另外，由于缺乏相关研究生或者大学本科课程，使这些观念更加得以强化。

这激励我产生一个想法：我要撰写的不只是一本书，而是关于 ESD 现象的一系列丛书。目的在于自底向上建立一个融合物理、器件和电路的 ESD 学科教育框架。毫无疑问，这将会是一个艰巨的任务。

本书的首要目标是集中探讨半导体器件和电路中的 ESD，希望为学习过力学、热物理、数学、电路设计或者半导体器件物理课程的非 ESD 工程师提供一些有价值的、可理解学习的资料。为了实现这一目标，教材必须包含既简单又经典的物理学基本知识。建立 ESD 学科基础的关键在于对数学和建模理论的关注。希望本书成为学习者有用的工具和未来的参考资料。

第二个目标是将早期的基本原理和现在以及未来的技术联系起来。本书的目的不仅是为今天的问题提供解决方案，而且还要将其概念长期保留下来。出于这个原因，本书将采用包含物理模型的文献来讨论当今相关的技术问题，以此来清晰呈现技术随工艺缩放趋势曲折发展的过程。此外，新的 ESD 学科将被证明是植根于过去并与现有的模型和文献有着各种联系。通过这种撰写方式，基本概念将彼此交织。

第三个目标是为 ESD 工程，尤其是新技术和新探索方面提供深度和广度。如果已经拥有重要的资料，当能够得到其他的资源时，人们通常会回避深度了。面对新的学科，为了理解该学科及其重要意义，有必要透彻地学习相关的资料。

第四个目标是提供一个教育基地，帮助建立对本质的理解、直觉和创造性。此时，对 ESD 保护结果的预测不是一个封闭式的解决方案。这不是因为 ESD 分析很棘手，而是因为 ESD 物理和产品结果不仅涉及微观和宏观的尺寸，同时也与没有覆盖较宽电流、电压及温度范围的模型和工具有关。ESD 模型和实际产品并非绝对的一对一映射。ESD 工程师需要一种知道事情为什么发生的直觉，以及能够将不完整的知识运用到工作中的能力。传授直觉绝非易事，培养创造能力却相对容易一点。

本系列丛书的第一本书包括以下内容：

第 1 章介绍与 ESD 相关的时间常数和物理脉冲模式。了解物理的时间常数，可以让我们确定哪一个物理现象是至关重要的。本书为正在学习已知不同类型 ESD 模型基本原理的学生提供了关于相互作用的物理时间常数的感性认识。定义静电力

(EQS) 的时间常数、磁准静态场 (MQS)、电磁 (EM)、热扩散过程、ESD 脉冲模型、电路的时间常数和封装模型是理解和直觉的关键。规范化和无量纲量也是理解物理系统规模和级别的关键。第 1 章从电气和电热的角度着重介绍了稳定性和不稳定性的概念。为了解击穿现象, 该部分将讨论帕邢、特普勒和汤森早期的工作。本章的重点在于介绍空气中以及硅中的击穿现象, 从而理解雪崩现象。本章将从时间和空间的角度讨论击穿的不稳定性, 后面将采用相同的角度理解 MOSFET, 并讨论电流收缩和整流。通过这种方法, 帮助学生了解测试仪、火花间隙、ESD 网络和 MOSFET 击穿的运行机制。

第 2 章着重于热模型、热物理和 ESD 电热模型。大多数电热 ESD 的基本模型从根本上是来源于几何约束条件和时间不变的假设下的热扩散方程的解。本章的重点是展示从时间和空间的角度在球形、圆柱形和矩形的几何形状中求解的一般方法。本章将介绍的数学方法包括: 格林函数的解、图像法、杜哈明齐次化原理、玻尔兹曼定律和基尔霍夫变换、感应势转移矩阵法、层状介质及其他方法。从这些方法进而推导出 Wunsch 和 Bell、Tasca、Arkhipov、Dwyer、Campbell、Ash、Smith - Littau 等人早期提出的 ESD 模型。这种教学方法, 实现简单的散热解决方案以及物理时间常数, 从而让 ESD 模型不再神秘。它的神奇之处在于热扩散方程的数学之美以及如何将它应用到基于热时间常数假设的简单几何结构和几何模型中。

第 3 章的重点是半导体器件和 ESD 问题。为了避免成为一本专门介绍半导体的图书, 本章只着重介绍某些受关注的领域和器件。器件部分包括二极管、电阻器、双极型晶体管、晶闸管、MOSFET。我们概括性地介绍了大电流、高电压和高温的影响。本章以热模型、陷阱能级模型、能级 - 能级隧穿模型为基础讨论了泄漏现象, 这对于了解泄漏很重要。电阻元件部分重点介绍速度饱和的影响。双极型晶体管部分将讨论约束, 如约翰逊约束、柯克效应及基本模型。晶闸管部分重点介绍不同触发情况的标准和通用的四极管模型, 保持电流的公式化也将被讨论。MOSFET 部分的重点是 MOSFET 的电流收缩、雪崩现象、寄生的双极型晶体管和 MOSFET 栅致泄漏及漏极泄漏现象。本章还讨论速度饱和效应以及它们与 ESD 现象的关系。本章的目的是将一些概念与前后章节联系起来。

在随后的章节中, 半导体的每个领域都会以一般的方式, 而非创造性器件模型的方式进行阐述。讲解这些效应的标准做法是: 将它应用到 MOSFET 晶体管、二极管或电阻中。当该模型可以被集成到所有的器件中时, 我们就推广了这门学科。

第 4 章的重点在于衬底和 ESD 现象。衬底电气和热模型会影响所有的电路和 ESD 元件。一般概念和模型能够被用于二极管、双极型晶体管、MOSFET 和晶闸管中。我们可以以培养通才的途径进行教学, 衬底是半无限域, 它包含多个器件, 可以单独或耦合处理。本章讨论衬底模型的概念, 如半无限域模型、传输线模型和损耗传输线。随后利用格林函数方法和新的几何模型介绍电气和热建模。此外, 为了介绍多触头或多个元件, 本章在涉及较复杂的情况及耦合现象时, 还将介绍 Ron



Troutman 用于闩锁效应中的转移阻抗的概念。这些模型可用于分析 ESD、噪声或闩锁效应。另一个方法是将衬底视为层间介质，麻省理工学院的 J. Melcher 在解决连续机电学中的问题及 J. A. Kong 在解决电动力学中的问题时，都广泛运用了这种技术。这些方法适用于解决 GaAs 衬底的 SOI 晶圆中可变掺杂区域的 ESD 方面问题。

第 5 章讨论了阱和 ESD。它用一般的方法介绍了扩散阱、倒阱、三层阱和衬底集电极之间的区别。这些区别基于 ESD 的实验工作，对纵向二极管的性能、纵向寄生 PNP 型晶体管、横向 NPN 型晶体管和其他 ESD 结构有着显著的影响。这些知识可以用于理解 ESD、闩锁效应和少子注入。同时，本章还将展示一些有关阱结构的 ESD 最新实验成果样品。

第 6 章讨论了隔离结构对于 ESD 稳定性的影响。隔离结构包括 LOCOS 隔离、浅槽隔离和深槽隔离。这些结构将对 ESD 网络的性能和闩锁效应有重要影响。本章分别介绍 ESD 器件对于 LOCOS 和 STI 的影响，对 LOCOS 和 STI 结构的仿真和实验结果也进行了讨论。

第 7 章讨论 MOSFET 的漏结构和金属硅化物。MOSFET 的漏结构和金属硅化物对 ESD 保护具有显著的影响。本章介绍了 MOSFET 的漏工程演变以及从钛向钴硅化物的过渡，同时简要介绍了钛的性质、向低电阻的过渡以及如何使用钼协助过渡。本章的重点是 ESD 导致的与金属硅化物相关的自加热效应的热模型。

第 8 章涉及电介质和 ESD 现象。本章首先讨论了 Fong 和 Hu 的介质故障的模型，随后介绍了 D. Lin 提出的直流和脉冲现象的模型区别。本章主要讨论了电介质的物理原理。若要全面介绍电介质需要大量篇幅，因此本章仅仅展示电介质的部分成果。

第 9 章涉及互连和 ESD。本章通过介绍铝互连、铜互连和铜/低 k 层间介质系统来讨论连接和 ESD。虽然现在有许多的互连模型，但是本章将着重介绍 Banerjee 和作者所提出的互连模型。电阻器的模型（如 Smith - Littau 模型）适用于互连，此外，Maloney、Vinson 和 Salome 也提出了模型。在有关 n 阱章节中讨论的模型同样也能用于互连。本章并不只是一个详尽的互连模型清单，对许多新的问题，如低 k 电介质、填充的形状、失效、ESD 电迁移的研究等方面的问题也进行了简要讨论。此外，本章还展示了 P. Y. Tan 和 S. Sherry 关于材料变化和电磁影响的相关资料。这些模型也适用于理解在磁记录元件中的 ESD 故障，例如磁阻磁头、巨磁阻磁头和隧道磁阻头。

第 10 章讲解了绝缘体上硅（SOI）技术和 ESD。人们对于 SOI 技术的兴趣日益增强，它是 CMOS 技术的一种自然延伸，给 ESD 保护也引入了新的问题。本章讨论了 SOI 中的横向多晶硅栅控二极管结构，还介绍了 SOI 二极管模型和热模型。从培养通才的方法出发，SOI 建模是一种由几何形状所决定的，本征的格林函数热模型，并且衬底可以被视为一个分层介质问题。本章还介绍了动态阈值 SOI 器件，展现了 SOI 环境中新的机遇。SOI 技术将继续被广泛应用于地面和航空中。本章介绍了

在现代 CMOS 技术中 SOI 的早期工作。本章从 1994 年在 IBM 公司写出第一个版本开始到现在拥有着许多读者。

第 11 章介绍了硅 - 锗 (SiGe)、硅 - 锗 - 碳 (SiGeC) 技术和 ESD。本章对硅锗器件物理和 ESD 现象做了简要的讨论。本章着重从 ESD 角度出发, 介绍硅双极型晶体管与硅 - 锗、硅 - 锗和硅锗碳器件之间的区别。本章内容非常新颖, 直至 2000 年, 第一篇关于 SiGe 双极型晶体管 ESD 的文献才被发表。本章从第一次出版到现在拥有的读者数量迅速增加。

第 12 章介绍了未来的器件, 目前还没有相关的 ESD 测试报告。本章简要地介绍应变硅器件、鳍状场效应晶体管 (Fin - FET)、碳纳米管和其他有望在未来面世的器件。

从发现静电现象至今已经有 2600 年了, 但是直到现在, 我们才撰写了这本教材以适应这门学科的教学。在本书中, 我需要找到一个快乐的介质, 在基本原理和适用于现代的技术之间架起一座桥, 旨在让读者能够通晓过去, 预知未来。好好去读这本书吧, 并透彻理解 ESD 的本质。等待我们学习的还有太多太多。

**B' 'H**

**Steven H. Voldman**

**IEEE 会士**

## 致 谢

我要感谢在我个人的学术和职业发展道路上给予我帮助的人们。过去有很多人一直指引着我，从只言片语到多年的相互交流。布法罗大学和麻省理工学院的教师们对于我在连续介质力学、连续机电学、静电学和半导体领域的发展方向和兴趣有着至关重要的影响。我要感谢布法罗大学的工程科学课程和 Irving Shames 教授、Herbert Reismann 教授以及 Stephen Margolis 教授在热学、机械、电气等领域给予我的支持和关注。我要感谢麻省理工学院电气工程 (EE) 系、等离子体聚变中心和高电压研究实验室 (HVRL) 在等离子体物理、电动力学、静电学和半导体领域的支持。James R. Melcher 教授、Markus Zahn 教授、Cliff Fonstad 教授、Louis D. Smullin 教授、J. A. Kong 教授、David Epstein 教授和 C. Cook 教授以及其他电气工程系教员帮助我理解连续机电学、静电学和半导体领域的技术材料，协助课程材料开发，以及教学与教育用课本开发。

在 IBM 公司，我有幸遇到许多来自 IBM 公司伯灵顿佛蒙特分部、东费什基尔分部、T. J. Watson 研发中心的导师和挚友，以及来自 IBM 公司波基普西分部、罗切斯特分部、奥斯汀分部、马纳萨斯分部、金士顿分部、恩迪科特分部和罗利分部的电路设计师们。过去的 22 年来，我很幸运能收到许多 IBM 公司工程师和科学家的意见和建议并能与他们进行互动，我要感谢早年在 IBM 公司给予我指导的半导体导师：Ron Troutman、Wendell Noble、Badih El - Kareh、Ed Nowak、Eric Adler、George Sai - Halasz、Tak Ning、Denny Tang、Robert Dennard、Matt Wordeman、Jack Y. - C. Sun、John Aitkens、Paul Bakeman、Andre LeBlanc、Andre Forcier、Bruno Aimi、Charles Stapper、Peter Cottrell 和 Dale Critchlow。在半导体的发展过程中，我也想感谢我的同伴和共事者：Michael Hargrove、James Slinkman、Stephen Furkay、Jeffery B. Johnson、Stephen Geissler、Toshi Furukawa、Jim Nakos、Jim Adkisson、Terry Hook 和 Chris Long。我想感谢我的经理 John Hildebeitel、Jim McNichol、Mark Hakey、Jim Dunn 和 Stephen St. Onge 在我学习 ESD 过程中给予的支持。我要感谢 IBM 失效分析团队，James Never、Peter Czahor，还有所有其他在我学习 ESD 的过程中多年协助诊断 ESD 故障的人们。此外，在 ESD 的设计和开发过程中，我想感谢在过去 22 年里曾一起学习和交流电路以及技术问题的电路设计师和 I/O 的团队：Roy Flaker、Jack Gersbach、Russel Houghton、Jeffery Chu、Richard Parent、Howard Kalter、H. S. Lee、David Pricer、Thomas Maffit、Jeffery Dreibelbis、Charles Drake、David Hui、Daniel Dreps、Robert Williams、Daniel Young、John Bialas、Roger Gregor、Harold Pilo、Geordie Braceras、Tony Correale、Douglas Stout、Ron Piro、Jeffery Sloan、James Pequignot、

Francis Chan、Sam Ray 等。除此之外，在电路和 ESD 器件的发展中，我要感谢以下微处理器设计团队中的电路设计者：摩托罗拉、IBM、AMD、康柏、新视代、全美达、IDQ 和 Cyrix。特别感谢摩托罗拉的 Gianfranco Gerosa、新视代的 Donald Draper、和全美达的 Mark Johnson。

在 ESD 学科中，我想向多年来支持我的 SEMATECH ESD 组，EOS / ESD 研讨会的 ESD 万隆工程设备测试标准委员会，以及讨论 ESD 保护和门锁效应的人们表达我的谢意，他们是：Charvaka Duvvury、Timothy - Maloney、Elyse Rosenbaum 教授、Ming - Dou Ker 教授、Patrick Juliano、Ajith Amerasekera、Fred Kuper 教授，Jeremy Smith、Eugene Worley、Robert Ashton、Warren Anderson、Michael Chaine、Leo G. Henry、Mark Kelly、Jon Barth、David Bennett、Gary Weiss、Corrine Richier、Marise BaFluer、Richard Ida、Natarajan Mahadeva Iyer、M. K. Radhakrishnan、Gianluca Boselli、Brenda McCaffrey、Ann (Fletcher) Rand、Ron Gibson 和 John Kinnear。我想感谢 ESD 协会办公室在出版刊物、标准制定、会议活动等方面的支持，特别感谢 Lisa Pimpinella。我要感谢国际可靠性物理研讨会的工作人员，以及为举办有关 ESD 和门锁效应讲座和辅导提供机会的委员会。我要感谢支持国际物理故障分析研讨会，IEEE 可靠性分会和新加坡的特许半导体公司在开发 ESD 教程中提供的支持。我要特别感谢中国台湾交通大学 Ker Ming - Dou 教授和 Steve Chung 教授以及中国台湾 ESD 研讨会。还要特别感谢 Shun - Lien Chuang 教授和伊利诺伊州香槟分校的 Elyse Rosenbaum 教授。我要感谢我暑期的学生的辛勤工作——来自佛蒙特州埃塞克斯的 Kimberly Morriseau、UIUC 的 Patrick Juliano、普林斯顿大学的 Brian Roman 和宾夕法尼亚州立大学的 Anne Watson，他们协作和参与了 ESD 和门锁现象的实验和发现。

最重要的是我的孩子们，Aaron Samuel Voldman、Rachel Peshia Voldman 和我的妻子 Annie Brown Voldman。他们全心支持着我的工作，并尽力减少对生活的需求和欲望，让我们的生活不断向前，使我们的生活走在正确的道路上。当然还要感谢我的父母，Carl 和 Blossom Voldman 及其他所有的家庭成员。

**B''H**

**Steven H. Voldman**

**IEEE 会士**

# 目 录

作者简介

译者序

前言

致谢

第 1 章 静电和热电物理学 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 时间常数法 .....	4
1.2.1 ESD 时间常数 .....	4
1.2.2 时间常数的层次结构 .....	8
1.2.3 热学时间常数 .....	8
1.2.4 热扩散 .....	8
1.2.5 绝热、热扩散的时间尺度和稳定状态 .....	9
1.2.6 电准静态场和磁准静态场 .....	10
1.3 不稳定性 .....	11
1.3.1 电气不稳定性 .....	11
1.3.2 热电不稳定性 .....	12
1.3.3 空间不稳定性与电流收缩 .....	14
1.4 击穿 .....	17
1.4.1 帕邢击穿理论 .....	17
1.4.2 汤森理论 .....	17
1.4.3 托普勒定律 .....	18
1.5 雪崩击穿 .....	18
1.5.1 空气击穿 .....	19
1.5.2 空气击穿和峰值电流 .....	21
1.5.3 空气击穿和上升时间 .....	22
1.5.4 中等离子体和微等离子体 .....	23
1.5.5 中等离子体现象 .....	23
习题 .....	24
参考文献 .....	24

<b>第 2 章 热电方法和 ESD 模型</b> .....	26
2.1 热电方法 .....	26
2.1.1 格林函数和镜像方法 .....	26
2.1.2 热传导方程的积分变换 .....	29
2.1.3 流势传递关系矩阵方法学 .....	32
2.1.4 可变热导率热方程 .....	34
2.1.5 Duhamel 公式 .....	37
2.2 电热模型 .....	38
2.2.1 Tasca 模型 .....	38
2.2.2 Wunsch - Bell 模型 .....	40
2.2.3 Smith - Littau 模型 .....	43
2.2.4 Arkhipov - Astvatsuryan - Godovosyn - Rudenko 模型 .....	45
2.2.5 Vlasov - Sinkevitch 模型 .....	45
2.2.6 Dwyer - Franklin - Campbell 模型 .....	45
2.2.7 Greve 模型 .....	50
2.2.8 负微分电阻模型 .....	50
2.2.9 Ash 模型 .....	51
2.2.10 统计模型 .....	53
习题 .....	55
参考文献 .....	56
<b>第 3 章 半导体器件和 ESD</b> .....	57
3.1 器件物理 .....	57
3.1.1 非等温仿真 .....	58
3.2 二极管 .....	59
3.2.1 二极管方程 .....	59
3.2.2 复合和产生机制 .....	64
3.3 双极型大电流器件的物理 .....	71
3.3.1 双极型晶体管特性方程 .....	71
3.3.2 基区扩展效应 (Kirk Effect) .....	72
3.3.3 Johnson 限制 .....	73
3.4 晶闸管 .....	75
3.4.1 再生反馈 .....	77
3.5 电阻 .....	81
3.6 MOSFET 大电流器件物理 .....	84
3.6.1 寄生双极型晶体管方程 .....	84

## XIV **ESD 物理与器件**

3.6.2	雪崩击穿和恢复	87
3.6.3	不稳定和电流约束模型	88
3.6.4	介质击穿	89
3.6.5	栅致漏电 (GIDL)	91
	习题	92
	参考文献	92
<b>第4章</b>	<b>衬底和 ESD</b>	<b>97</b>
4.1	衬底分析方法	97
4.2	视作半无限域的衬底	97
4.3	采用传输矩阵方法表征层状介质的衬底	99
4.4	衬底传输线模型	101
4.5	衬底损耗的传输线模型	103
4.6	衬底吸收、反射和传输	105
4.7	衬底电气和温度离散化	106
4.8	衬底效应: 电气传输阻抗	109
4.9	衬底效应: 热传输阻抗	111
4.10	衬底温度阻抗模型	113
4.10.1	可变横截面模型	113
4.10.2	可变椭圆横截面模型	115
4.10.3	背面衬底集总分析模型	117
4.11	重掺杂衬底	117
4.12	轻掺杂衬底	118
	习题	120
	参考文献	120
<b>第5章</b>	<b>阱、衬底集电极和 ESD</b>	<b>122</b>
5.1	扩散阱	122
5.2	倒阱及纵向调制的阱	126
5.2.1	倒阱	126
5.2.2	倒阱衬底调制	129
5.2.3	倒阱及 ESD 缩放	131
5.3	三阱及隔离的 MOSFET	134
5.4	整流电阻	136
5.5	衬底集电极	138
	习题	142
	参考文献	143

<b>第 6 章 隔离结构和 ESD</b> .....	145
6.1 隔离结构 .....	145
6.1.1 局部氧化 (LOCOS) 隔离 .....	145
6.1.2 局部氧化 (LOCOS) 界 ESD 结构 .....	147
6.2 浅沟隔离 .....	150
6.2.1 浅沟隔离下拉 .....	151
6.2.2 浅沟隔离界 ESD 结构 .....	152
6.3 深沟隔离 .....	158
6.3.1 深沟保护环结构 .....	159
6.3.2 深沟及门锁 .....	160
6.3.3 深沟及 ESD 结构 .....	160
习题 .....	161
参考文献 .....	162
<b>第 7 章 漏工程、自对准硅化物与 ESD</b> .....	164
7.1 结 .....	164
7.1.1 突变结 .....	165
7.1.2 低掺杂漏 .....	166
7.1.3 扩展注入 .....	167
7.2 自对准硅化物及 ESD .....	168
7.2.1 自对准硅化物电阻模型 .....	169
7.2.2 硅化钛 .....	170
7.2.3 钛、钼金属硅化物 .....	176
7.2.4 硅化钴 .....	177
习题 .....	178
参考文献 .....	179
<b>第 8 章 电介质与 ESD</b> .....	181
8.1 Fong 和 Hu 模型 .....	182
8.2 Lin 模型 .....	184
8.3 击穿电荷 .....	185
8.4 临界介质厚度 .....	188
8.5 ESD 脉冲事件与击穿电荷介电模型 .....	189
8.6 瞬时脉冲事件与击穿电荷介电模型 .....	190
8.7 超薄介质 .....	192
习题 .....	193



参考文献	193
<b>第 9 章 互连和 ESD</b>	<b>196</b>
9.1 铝互连	197
9.2 铜互连	203
9.2.1 铜通孔	208
9.3 低 k 材料和互连	210
9.4 抛光终止和互连	215
9.5 填充物和互连	218
9.6 铜薄膜应力和电迁移	219
9.7 互连故障和空洞	221
9.8 绝缘结构机械应力	222
习题	224
参考文献	224
<b>第 10 章 绝缘体上硅 (SOI) 与 ESD</b>	<b>227</b>
10.1 SOI 的电热模型	228
10.1.1 SOI 电热传输线模型	230
10.1.2 SOI 电热传输线模型级数解	231
10.2 SOI ESD 二极管及元件	232
10.2.1 突变结工艺	232
10.2.2 外延注入工艺	235
10.2.3 Halo 注入技术	237
10.3 SOI 的互连线	237
10.3.1 铝互连线	237
10.3.2 SOI 和铜互连	238
10.3.3 等比例缩放	240
10.4 非主流器件	241
10.4.1 双衬底掺杂的 SOI 二极管	241
10.4.2 栅金属未覆盖 SOI 二极管结构	241
10.5 SOI 动态阈值 MOSFET 与 ESD	241
10.5.1 SOI 动态阈值的 ESD 结构	242
10.6 未来的 SOI 及 ESD	245
习题	246
参考文献	246