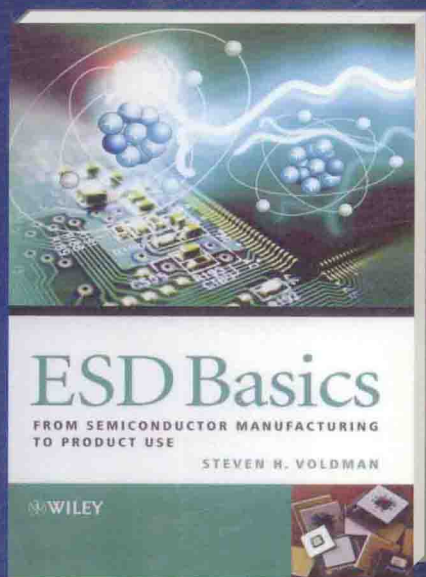




WILEY



ESD Basics

From Semiconductor Manufacturing to Product Use

# ESD揭秘

## 静电防护原理和典型应用

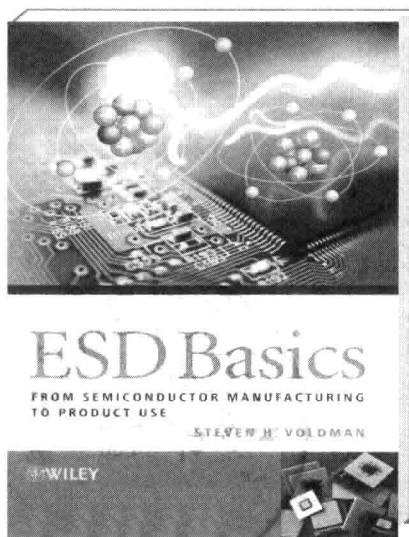
[美] Steven H. Voldman 著 来萍 恩云飞 肖庆中 等译



机械工业出版社  
China Machine Press



电子与嵌入式系统  
设计译丛



ESD Basics

From Semiconductor Manufacturing to Product Use

# ESD揭秘

## 静电防护原理和典型应用

[美] Steven H. Voldman 著 来萍 恩云飞 肖庆中 等译



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

ESD 揭秘: 静电防护原理和典型应用 / (美) 沃尔德曼 (Voldman, S. H.) 著; 来萍等译.  
—北京: 机械工业出版社, 2014.5

(电子与嵌入式系统设计译丛)

书名原文: ESD Basics: From Semiconductor Manufacturing to Product Use

ISBN 978-7-111-46365-8

I. E… II. ①沃… ②来… III. 芯片—静电防护—设计 IV. TN430.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 067760 号

本书版权登记号: 图字: 01-2013-2603

Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled ESD Basics: From Semiconductor Manufacturing To Product Use, ISBN 978-0-470-97971-6, by Steven H. Voldman, Published by John Wiley & Sons. 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约翰·威利父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

## ESD 揭秘: 静电防护原理和典型应用

[美] Steven H. Voldman 著

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 秦 健

责任校对: 董纪丽

印 刷: 三河市宏图印务有限公司

版 次: 2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 186mm × 240mm 1/16

印 张: 11

书 号: ISBN 978-7-111-46365-8

定 价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

# 译 者 序

半导体器件从诞生之日起就面临着静电放电 (ESD) 带来的可靠性问题。随着器件尺寸减小、集成度提高, 静电问题不仅不消除反而有可能愈加严重。因此, 对于半导体器件, 静电放电是一个需要关注的永恒问题。

半导体器件的静电问题涉及范围很广, 覆盖产品从研发设计到生产制造乃至使用维修等全寿命过程。目前已有大量的关于半导体器件 ESD 方面的书籍和标准, 主要集中在半导体器件片上 ESD 保护设计、生产制造过程的防 ESD 控制以及 ESD 测试等几个方面, 为专业技术人员提供指导。但是, 对非专业以及刚刚入门的技术人员, 理解我们身边的静电问题及如何对半导体器件或系统实施有效的防护也是非常必要的。

本书作者 Steven H. Voldman 博士总结其在半导体器件静电放电 (ESD) 领域 20 多年的研究和工作经验, 撰写了本书, 系统而全面地阐述了 ESD 的基本原理、现实中的 ESD 环境、半导体器件制造、处理和组装过程的 ESD 现象、半导体器件片上和片外保护技术, 以及对未来纳米结构中的 ESD 问题展望等, 这是一本可以帮助读者了解半导体器件 ESD 及其所有相关问题的优秀基础性书籍。

电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室从 20 世纪 90 年代初开始, 就开展了半导体器件 ESD 设计、检测和防护方面的技术研究及工程应用, 译者在这方面有比较丰富的知识和经验, 因此, 非常高兴能将此书介绍给国内的相关技术人员。

本书由来萍和恩云飞研究员组织翻译和审校, 其中作者介绍、前言、致谢、第 1 章由刘宏志、恩云飞翻译, 第 2 章和第 3 章由来萍翻译, 第 4 章由肖庆中翻译, 第 5 章由何玉娟翻译, 第 6 章由王力纬翻译, 第 7 章由师谦翻译, 并由恩云飞、来萍、肖庆中、师谦、刘虹志、王力纬、何玉娟、陈义强进行了审校。

为了给读者提供一本具有专业水平的科技书籍, 译者对书稿进行了多次审校, 还针对术语表、标准中的专业术语进行了集体讨论, 以求尽量减少技术和编辑错误。但由于译者水平所限, 难免会有不妥之处, 恳请读者批评指正。

# 前 言

本书的创作源于从制造过程到产品的静电放电基本原理的阅读需求。随着制造技术的发展，半导体器件规模与系统都在发生变化，对可靠性与 ESD 防护的需求和要求也随之发生改变。本书旨在构建实际环境与基本的 ESD 现象之间的联系。

尽管目前已经出版了有关片上 ESD 设计的大量书籍，但它们主要针对相关领域的专业技术人员。而对于非相关领域的技术人员，理解现实中的各种静电问题仍然是十分必要的。如今，静电放电与电磁干扰问题在我们身边比比皆是：从油箱爆炸、汽车中的静电放电、电缆引起的计算机服务器门锁到与汽车噪声相关的问题。因此，对于非专业人士来说，仍然有必要理解我们身边的静电问题以及如何对它们实施有效防护。

本书的目的如下：

- 让读者了解静电学和摩擦生电的基础知识，并将它们与半导体制造、处理和组装过程中的静电放电现象联系在一起。在讲述基本原理的同时，也介绍部分静电学发展史的内容。
- 分别对静电放电 (ESD)、摩擦生电、过电应力 (EOS) 和门锁进行专题讲解，引发读者对电磁干扰 (EMI) 和电磁兼容 (EMC) 等问题的思考。
- 探讨如今的芯片和系统中所存在的上述问题，书中所列实例将尽量与主题相关并且具有趣味性。
- 说明如何利用片上保护网络来对半导体芯片进行 ESD 保护。
- 向读者介绍半导体芯片与系统的 ESD 测试方法。
- 探讨未来静电放电、相关标准、测试技术以及产品设计的发展方向。
- 展望未来新型纳米结构和纳米系统可能出现的静电和电磁问题。

本书内容安排如下：

- 第 1 章综述静电学概念、术语和基本原理。前半部分以静电学发展史上各个时期的主要历史人物作为主线，简要介绍了静电学和摩擦起电现象，包括了泰勒、格雷、达菲、富兰克林、托普勒、法拉第、卡文迪许、库仑、麦克斯韦等人的故

事。后半部分则主要介绍目前电子元件和系统中所存在的静电放电 (ESD)、过电应力 (EOS)、闩锁、电磁干扰 (EMI) 和电磁兼容 (EMC) 等问题。

- 第 2 章讨论了如何对制造环境中的静电放电进行控制。旨在让读者了解在制造中, 建立静电放电防护区所涉及的问题以及为此而采用的测试方法、标准和控制程序。
- 第 3 章深入阐述静电放电、过电应力、电磁干扰和电磁兼容。以上每个领域均有大量的出版物。在前言部分, 已列举了部分基本概念、专业术语和测试标准。
- 第 4 章探讨了目前及未来应用中系统级的静电放电、过电应力、闩锁、电磁干扰和电磁兼容等问题。讨论了服务器、笔记本电脑、便携设备、手机、磁盘驱动器、数码相机、汽车和空间应用中的静电问题, 让读者充分认识到现代电子环境中存在着大量的静电问题, 并讨论了系统级的静电放电测试, 如 IEC 61000-4-2 标准、HMM、CDE 和 CBM 等。
- 第 5 章主要介绍半导体器件的防护方案, 重点介绍片上 ESD 防护网络的构建、数字、模拟和射频应用中的 ESD 防护、ESD 电路原理图、版图设计以及半导体芯片的版图规划。
- 第 6 章介绍系统级防护解决方案, 包括目前正在应用的系统级静电放电、电磁干扰和电磁兼容防护方案, 以及系统级电磁兼容扫描等新技术。
- 第 7 章讨论了当前及未来纳米结构中的 ESD 防护问题。随着器件尺寸达到纳米尺度, 所有器件都必须解决静电、静电放电、电磁干扰和过电应力等问题。这种情况将在光刻掩模、磁记录器件、半导体器件、纳米线和纳米管中切实存在。作为结束章节, 该章还介绍微型马达、微镜、射频 MEMS 开关和其他新型器件中的情况。

但愿本序能激发读者对于静电放电、过电应力、电磁干扰和电磁兼容等问题的兴趣, 并了解它们如何与现实生活中的现象相联系。若读者想进一步了解静电放电防护, 可参阅以下书籍:《ESD 物理与器件》、《ESD 电路与技术》、《ESD 射频电路与技术》、《ESD 失效机理与模型》、《ESD 设计与综合》和《闩锁效应》。

愿大家喜欢这本书, 享受学习静电放电、过电应力、闩锁、电磁干扰和电磁兼容现象的乐趣!

Baruch HaShem (B"H)

Steven H. Voldman 博士

IEEE 会士

# 致 谢

感谢美国半导体行业技术联盟 (SEMATECH)、ESD 协会、IEEE 和 JEDEC 组织多年来对我的支持。感谢 IBM、Qimonda、TSMC 和 Intersil 公司的支持。本书内容系我 30 年来从事双极存储器、DRAM、SRAM、NVRAM、微处理器、ASIC、混合电压、混合信号、射频和功率应用技术等方面工作的总结而得。我有幸参与了众多技术团队的工作，结识了大量客户。有幸从事双极存储器、CMOS DRAM、CMOS 逻辑、ASIC、绝缘体上硅 (SOI) 以及  $1\mu\text{m} \sim 45\text{nm}$  的锗硅技术研究。有幸成为众多优秀技术和设计团队中的一员，他们想法新颖、聪明而且富有创造力。这为把科学实验付诸实践，并将 ESD 设计中的新想法赋予实施和产品应用创造了条件。

感谢那些给我提供机会在会议、论坛、企业和大学里进行专题报告和授课的机构，这也给了我写作本书的动力。感谢以下大学的教职员：麻省理工学院、斯坦福大学、中佛罗里达大学、凡德比特大学、伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校、加州大学河滨分校、巴法罗大学、新加坡国立大学、南洋理工大学、北京大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、华中科技大学、马来西亚理科大学、马来西亚博特拉大学、马来西亚伯乐学院、泰国朱拉隆功大学、泰国马汉科大学、泰国农业大学、泰国国立法政大学和菲律宾马布亚科技学院。

感谢 EOS/ESD 年会、国际可靠性物理年会 (IRPS)、台湾静电放电研讨会 (T-ESDC)、国际电子器件会议 (IEDM)、固态和集成电路技术国际会议 (ICSICT)、物理与失效分析国际会议 (IPFA)、IEEE ASICON 和 IEEE 智能信号处理与通信系统 (ISPACS) 会议多年来的支持，使得我有机会能够进行讲座、特邀报告和短期培训课程。

感谢众多朋友们 20 年来在 ESD 领域的合作与支持：Ming Dou Ker 教授、J. J. Liou 教授、Albert Wang 教授、Elyse Rosenbaum 教授、Jo Chiranut Sa-ngiamsak 教授、Timothy J. Maloney、Charvaka Duvvury、Eugene Worley、Robert Ashton、Yehuda Smooha、Vladislav Vashchenko、Ann Concannon、Albert Wallash、Vessilin Vassilev、Warren Anderson、Marie Denison、Alan Richter、Andrew Olney、Bruce Atwood、Jon Barth、Evan Grund、David Bennett、Tom Meuse、Michael Hopkins、Yoon Huh、Jin Min、Keichi Hasegawa、Nathan Peachey、Kathy

Muhonen、Augusto Tazzoli、Gaudenzio Menneghesso、Marise BaFleur、Jeremy Smith、Nisha Ram、Swee K. Lau、Tom Diep、Lifang Lou、Stephen Beebe、Michael Chainé、Pee Ya Tan、Theo Smedes、Markus Mergens、Christian Russ、Harold Gossner、Wolfgang Stadler、Ming Hsiang Song、J. C. Tseng、J.H. Lee、Michael Wu、Erin Liao、Stephen Gaul、Jean-Michel Tschann、Tze Wee Chen、Shu Qing Cao、Slavica Malobabic、David Ellis、Blerina Aliaj、Lin Lin、David Swenson、Donn Bellmore、Ed Chase、Doug Smith、W. Greason、Stephen Halperin、Tom Albano、Ted Dangelmayer、Terry Welsher、John Kinnear 和 Ron Gibson。

感谢 ESD 协会办公室对于出版、标准开发和会议举办等活动的支持。感谢 John Wiley & Sons 国际出版公司及其员工对本书以及本系列 ESD 丛书的支持。

致我的孩子 Aaron Samuel Voldman 和 Rachel Pesha Voldman，祝你们好运常在！

感谢我的妻子 Annie Brown Voldman 多年来的支持和付出。

感谢我的父母 Carl 和 Blossom Voldman。

Baruch HaShem (B"H)

Steven H. Voldman 博士

IEEE 会士



## 作者简介

Steven H. Voldman 博士是静电放电 (ESD) 领域首位 IEEE 会士, 其主要贡献在于 CMOS、绝缘体上硅和硅锗技术的静电放电防护。他于 1979 年获得巴法罗大学工程学学士学位; 1981 年获得麻省理工学院电气工程硕士学位; 在 IBM 固定员工研究学者进修计划的资助下, 先后于 1986 年和 1991 年获得佛蒙特大学工程物理学硕士学位和电气工程博士学位。

在 IBM 开发部门工作的 25 年间, Voldman 一直致力于半导体器件物理、器件设计和可靠性研究 (如软错误率 (SER)、热电子、漏电机理、门锁和静电放电等)。他进行门锁及其抑制技术研究的时间更是长达 27 年。研究涉及双极 SRAM、CMOS DRAM、CMOS 逻辑电路、绝缘体上硅 (SOI)、BiCMOS、锗硅 (SiGe)、射频 CMOS、射频 SOI、智能电源和图像处理等。2008 年, 进入 Qimonda DRAM 研发团队, 从事 70nm、58nm 和 48nm CMOS 技术研究。同年, 创办了自己的公司, 并作为台积电 (TSMC) 45nm 静电放电与门锁开发团队的一员在新竹总部工作。2009 ~ 2011 年, 他担任 Intersil 公司静电放电与门锁研发的资深高级工程师。自 2011 年起, 他开始在自己的公司进行专职工作, 提供咨询顾问、教学和专利诉讼专家证人的服务。

1995 ~ 2000 年间, Voldman 博士担任美国半导体行业技术联盟 (SEMATECH) ESD 工作组主席, 领导该组建立 ESD 技术基准, 成立首个传输线脉冲 (TLP) 标准开发小组, 制定长期发展规划, 与 JEDEC-ESD 协会协调人体模型 (HBM) 标准。2000 ~ 2010 年, 他担任 ESD 协会 TLP 和超快 TLP (VF-TLP) 工作组主席, 起草 TLP 和 VF-TLP 的第一份规程及标准。Voldman 还是 ESD 协会董事会和教育委员会成员。他发起并开展了“ESD 在校园”活动, 该活动旨在将 ESD 课程带入全球各大校园, 并与学校教职员工和学生开展互动。如今, 该活动已在美国、新加坡、中国台湾、马来西亚、菲律宾、泰国、印度和中国等国家或地区 40 多所大学校园内开展。

Voldman 博士在美国、中国、新加坡、马来西亚、中国台湾、斯里兰卡和以色列等国家或地区多次举办了有关 ESD、门锁等方面的短期课程或专题报告。他还获得了 240 多个有关 ESD 和 CMOS 门锁效应的美国授权专利, 亦是该领域专利诉讼案中的专家证人。

Voldman 博士也是《科学美国人》杂志的撰稿人，并编写了首套 ESD 与门锁系列丛书，包括《ESD 物理与器件》、《ESD 电路与器件》、《ESD 射频技术与电路》、《门锁效应》、《ESD 失效机理与模型》和《ESD 设计与综合》。同时，他也是《锗硅——技术、建模及设计》和《纳米电子学——纳米线、分子电子学与纳米器件》等书籍的撰稿人。目前，《ESD 电路与器件》和《ESD 射频技术与电路》中译本已出版发行。

# 目 录

译者序

前言

致谢

作者简介

## 第 1 章 静电学基本原理 ..... 1

1.1 引言 ..... 1

1.2 静电学 ..... 1

1.2.1 泰勒斯和静电引力 ..... 1

1.2.2 静电学和摩擦生电序列 ..... 2

1.2.3 摩擦生电序列和吉尔伯特 ..... 3

1.2.4 摩擦生电序列和格雷 ..... 4

1.2.5 摩擦生电序列和达菲 ..... 4

1.2.6 摩擦生电序列和富兰克林 ..... 4

1.2.7 静电学——西莫和人体  
模型 ..... 4

1.2.8 静电学——库仑和卡文  
迪许 ..... 5

1.2.9 静电学——法拉第和冰桶  
实验 ..... 5

1.2.10 静电学——法拉第和  
麦克斯韦 ..... 5

1.2.11 静电学——帕邢 ..... 5

1.2.12 静电学——斯托尼与  
“电子” ..... 5

1.3 摩擦生电——它是如何发生的 ..... 6

1.4 导体、半导体和绝缘体 ..... 7

1.5 静电耗散材料 ..... 7

1.6 静电放电和材料 ..... 7

1.7 充电和库仑定律 ..... 8

1.7.1 摩擦生电 ..... 8

1.7.2 感应生电 ..... 8

1.7.3 传导生电 ..... 9

1.8 电磁学和电动力学 ..... 9

1.9 电击穿 ..... 9

1.9.1 静电放电与击穿 ..... 9

1.9.2 击穿与帕邢定律 ..... 10

1.9.3 击穿和汤森德 ..... 10

1.9.4 击穿与托普勒定律 ..... 11

1.9.5 雪崩击穿 ..... 11

1.10 电准静态和磁准静态 ..... 12

1.11 电动力学与麦克斯韦方程 ..... 13

1.12 静电放电 ..... 13

1.13 电磁兼容 ..... 13

1.14 电磁干扰 ..... 13

1.15 本章小结 ..... 14

参考文献 ..... 14

## 第 2 章 生产和静电的基本原理 ..... 18

2.1 材料、工具、人为因素和  
静电放电 ..... 19

2.2	制造环境和工具	19
2.3	生产设备和 ESD 生产问题	19
2.4	生产材料	20
2.5	测量和测试设备	20
2.6	接地及连接系统	22
2.7	工作台面	22
2.8	防静电腕带	22
2.9	在线监测仪	23
2.10	鞋类	23
2.11	地板	23
2.12	人员服装接地	23
2.13	空气离子化	24
2.14	座椅	25
2.15	推车	25
2.16	包装和运输	25
2.16.1	运输包装管	25
2.16.2	托盘	26
2.17	ESD 识别	26
2.18	ESD 程序管理——12 步构建 ESD 战略	26
2.19	ESD 程序审核	27
2.20	防静电片上保护	27
2.21	本章小结	28
	参考文献	28

### 第 3 章 ESD、EOS、EMI、 EMC 和 闩锁效应 32

3.1	ESD、EOS、EMI、EMC 和 闩锁效应	32
3.1.1	ESD	32
3.1.2	过电应力	33
3.1.3	电磁干扰	33
3.1.4	电磁兼容	33

3.1.5	闩锁效应	33
3.2	ESD 模型	33
3.2.1	人体模型	34
3.2.2	机器模型	35
3.2.3	盒式模型	36
3.2.4	充电器件模型	36
3.2.5	传输线脉冲	37
3.2.6	超快传输线脉冲	39
3.3	过电应力	39
3.3.1	EOS 来源——雷击	40
3.3.2	EOS 来源——电磁脉冲	40
3.3.3	EOS 来源——机械装置	41
3.3.4	EOS 来源——配电装置	41
3.3.5	EOS 来源——开关、继电器 和线圈	41
3.3.6	EOS 设计流程和产品定义	41
3.3.7	EOS 来源——设计问题	42
3.3.8	EOS 失效机理	43
3.4	电磁干扰	45
3.5	电磁兼容	45
3.6	闩锁	45
3.7	本章小结	46
	参考文献	47

### 第 4 章 系统级 ESD 52

4.1	系统级测试	52
4.1.1	系统级测试目标	52
4.1.2	系统级与元器件级测试 失效判据的区别	53
4.2	系统与芯片何时相互影响	54
4.3	ESD 和系统级失效	54
4.3.1	ESD 电流和系统级失效	55
4.3.2	ESD 感应电场 / 感应磁场和	



5.4.3 共质心模拟信号引脚到 电源线的 ESD 网络·····	87	6.7.2 场发射器件·····	107
5.4.4 共质心模拟电路和 ESD 网络的协同综合·····	88	6.8 系统级瞬态解决方案·····	110
5.4.5 信号引脚到信号引脚的 差分对 ESD 网络·····	89	6.8.1 瞬态电压抑制器件·····	111
5.4.6 共质心信号引脚差分 ESD 保护·····	89	6.8.2 聚合物电压抑制器件·····	112
5.5 射频 ESD 设计·····	91	6.9 封装级机械 ESD 解决方案—— 机械撬棒·····	113
5.5.1 射频 ESD 设计原则·····	91	6.10 硬盘 ESD 解决方案·····	114
5.5.2 ESD 射频电路——信号 引脚 ESD 网络·····	96	6.10.1 内嵌“ESD 短路”·····	114
5.5.3 ESD 射频电路——ESD 电源钳位·····	97	6.10.2 电枢-机械“短路”——一 种内建的电气“撬棒”·····	114
5.5.4 ESD 射频电路——ESD 射频 $V_{SS}$ - $V_{SS}$ 网络·····	99	6.11 半导体芯片级解决方案—— 版图布局、版图及结构·····	115
5.6 本章小结·····	100	6.11.1 混合信号模拟和数字的 版图布局·····	116
参考文献·····	100	6.11.2 BCD 版图布局·····	116
<b>第 6 章 系统中的 ESD 问题及 解决方案·····</b>	<b>101</b>	6.11.3 片上系统设计的版图 布局·····	117
6.1 ESD 系统解决方案——从 最大到最小·····	101	6.12 半导体芯片解决方案——电源 栅格设计·····	118
6.2 航空航天解决方案·····	101	6.12.1 HMM 和 IEC 规范的 电源栅格及互连设计上 的考虑·····	118
6.3 油轮解决方案·····	101	6.12.2 ESD 电源钳位设计综合—— 响应 IEC 61000-4-2 的 ESD 电源钳位网络·····	119
6.4 汽车解决方案·····	102	6.13 ESD 和 EMC——当芯片 影响了系统·····	120
6.5 计算机和服务器·····	102	6.14 系统级和器件级 ESD 测试与 系统级响应·····	120
6.6 主板和板卡·····	103	6.14.1 ESD 测试中的时域反射和 阻抗方法学·····	120
6.6.1 系统板卡插入的触点·····	103	6.14.2 时域反射 ESD 测试系统 评估·····	121
6.6.2 系统级的电路板设计—— 接地设计·····	103		
6.7 系统级“板上”ESD 防护·····	104		
6.7.1 火花隙·····	105		

6.14.3 ESD 退化系统级方法—— 眼图测试	125	7.6 微马达	142
6.15 EMC 和 ESD 扫描	127	7.7 微机电射频开关	143
6.16 本章小结	129	7.8 微机电反射镜	145
参考文献	130	7.9 晶体管	146
<b>第 7 章 静电放电的未来</b>	<b>133</b>	7.9.1 晶体管—体硅和 SOI 技术	146
7.1 ESD 未来如何	133	7.9.2 晶体管和 FinFET	147
7.2 工厂与制造	133	7.9.3 FinFET 中的 ESD 问题	148
7.3 光刻掩膜与十字线	134	7.10 硅纳米线	149
7.3.1 光刻掩膜中的 ESD 问题	134	7.11 碳纳米管	149
7.3.2 光刻掩膜的雪崩击穿	135	7.12 未来的系统和系统设计	150
7.3.3 光刻掩膜的电模型	136	7.13 本章小结	150
7.3.4 光刻掩膜中的失效缺陷	137	参考文献	151
7.4 磁记录技术	138	<b>术语表</b>	<b>155</b>
7.5 微机电器件	140	<b>ESD 标准</b>	<b>157</b>

# 第 1 章

## 静电学基本原理

### 1.1 引言

我们都熟悉静电放电 (Electrostatic Discharge, ESD) 现象: 你穿着心爱的运动鞋在长毛地毯上缓慢走过, 忽然撞到了一个金属片, 接着就是“嚓—”的一声。我们人类会因此痛得叫出声来, 而带有微电子器件和纳米电子器件的产品会因此失效。<sup>[1]</sup>

无论是现在还是未来, 静电问题始终是电子器件和电子系统产业需要重点考虑的问题, 同样也是军火、炸药、化学和材料等工业领域需考虑的问题。任何工业, 只要静电问题可能影响到产品的质量、成品率, 造成产品的性能退化或物理损伤, 都需要考虑静电放电 (ESD)、过电应力 (Electrical Overstress, EOS)、电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI) 和电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 等方面的问题。

本书概要介绍了从产品的制造到使用中所出现的各种静电放电现象。正文部分将讨论静电学基本原理、制造中的静电问题、元器件级问题、系统级问题以及防静电设计。

那么, 我们从哪里开始介绍呢?

### 1.2 静电学

静电引力和静电放电现象的发现是人类对自然界最早的科学认知之一。历史上静电现象的最初发现要追溯到人类对于物质本源、天文和数学知识的早期探索以及希腊哲学的最初奠基, 甚至更早的时期。

#### 1.2.1 泰勒斯和静电引力

泰勒斯 (Thales), 生于公元前 624 年, 卒于公元前 546 年, 爱奥尼亚学派 (又称米利都学派) 创始人, 苏格拉底时期之前的古希腊七贤之一。泰勒斯是古希腊天文学家、数学家和哲学家, 也是发明家和工程师。他创立了追求知识的传统, 发展了科学理性思维, 建立了经验观察方法, 并提出通过猜想来质疑自然现象以了解其本质。米利都学派建立了质疑、



辩论、解释、辩护和考证的批判法。泰勒斯的学生包括欧几里得、毕达哥拉斯和欧德摩斯等<sup>[2]</sup>。

泰勒斯发现了琥珀摩擦后存在静电引力这一现象。他记载，摩擦后的琥珀能够吸引稻草。从此，希腊语中用于表示琥珀的单词“ελεκτρον”(翻译为电子“electron”)开始与电现象联系在一起。

泰勒斯的思想多记载于其门徒和其他希腊哲学家的著作中。亚里士多德(Aristotle)在他的《论灵魂》(411 a7-8)一书中指出“一些人认为整个宇宙都是有生命的，这出自泰勒斯的万物皆有灵”<sup>[3]</sup>。

静电现象的发现要早于人类对于物质本源的探索。当泰勒斯进行静电放电实验和静电引力研究时，希腊和罗马的物质的原子论学说还没有出现。无论是希腊的德谟克利特(Democritus, 公元前420年)和伊壁鸠鲁(Epicurus, 公元前370年)，还是罗马的卢克莱修(Lucretius, 公元前50年)，他们的原子论在时间上都晚于对静电现象的描述和思考。泰勒斯逝于原子学说正流行的时代。在他的墓志铭上写着：“伟大的泰勒斯长眠于此，他的智慧声望高达云霄<sup>[4]</sup>。”

Robert A. Millikan 在其1917年出版的《电子》一书引言中写道<sup>[5]</sup>：

很少有人能同时做到这两点：最先发现琥珀在摩擦作用下将产生一个新的显著的诱发态，即今人所谓的充电；同时也深信并首次明确提出所有这些现象必然存在着某种统一的规则，使得它们能够在逻辑上被理解和接受。事物状态发生明显变化必然起源于某种基本因素，寻找这些因素应该是所有自然科学的最终目的。就算是巧合，泰勒斯的成就也为他带来了无可置疑的双重荣誉。早在公元前600年，他就首次构思并正确指出了指导整个物理学从古发展至今的灵魂所在。尽管粗浅且不完善，他的描述却首次将之前彼此独立的物理部分(如辐射热、光、磁和电)联系在一起，并带领我们前所未有地接近事物的本质。

J. H. Jeans 在其《电学和磁学的数学理论》(1925年，第5版)中写道：

琥珀被摩擦后会吸引轻小物体的事实在希腊妇孺皆知。这要归功于泰勒斯。

第二个事实是卢克莱修所发现的某些矿物(天然磁石)会吸引铁。这两个事实构成了现代电磁学的基础。

### 1.2.2 静电学和摩擦生电序列

泰勒斯去世之后，静电放电现象的研究进展甚微。尽管历史不断向前发展，但摩擦生电和静电放电研究却落后于时代的变迁。在欧洲，人们历经罗马帝国、中世纪、黑死病、文艺复兴、宗教改革和社会大发展时期。在亚洲，当泰勒斯发现静电放电现象时，中国正处于周朝，随后历经了秦、汉、隋、唐、宋、元、明等朝代的更替，然而，静电研究却毫无进展。

随着社会的变迁，直到18世纪，人们对于静电现象的认识才有了较大进展。获得欧洲王室和法国、英国实验室资助的科学家们开始对摩擦生电和静电现象产生了研究兴趣。

那么，摩擦生电是怎么发生的呢？