



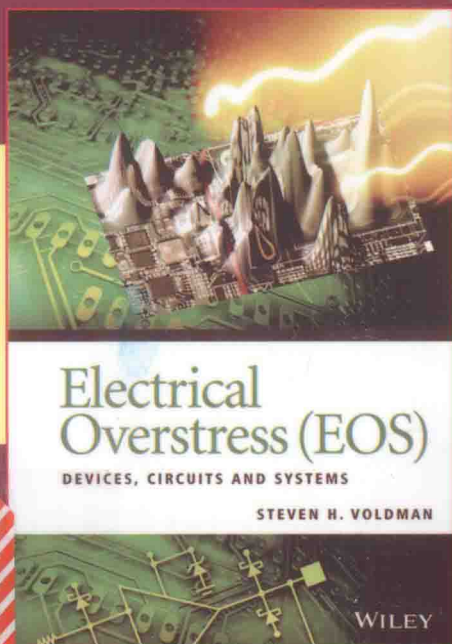
国际电气工程先进技术译丛

WILEY

过电应力 (EOS) 器件、电路与系统

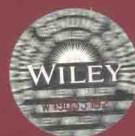
Electrical Overstress (EOS)
Devices, Circuits and Systems

[美] 史蒂文 H. 沃尔德曼 (Steven H. Voldman) 著
雷鑑铭 等译



◎ ESD领域首位IEEE Fellow的权威之作

◎ 通过大量实例深入探讨EOS器件、电路与系统设计，将EOS现象与现实环境相联系，使EOS理论工程化



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

过电应力 (EOS) 器件、 电路与系统

Electrical Overstress (EOS): Devices, Circuits and Systems

[美] 史蒂文 H. 沃尔德曼 (Steven H. Voldman) 著
雷鑑铭 等译



机械工业出版社

Copyright © 2014 John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled 〈Electrical Overstress (EOS): Devices, Circuits and Systems〉, ISBN 〈978 - 1 - 118 - 51188 - 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 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2014 - 2395 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

过电应力 (EOS) 器件、电路与系统 / (美) 沃尔德曼 (Voldman, S. H.) 著; 雷鑑铭等译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 12
(国际电气工程先进技术译丛)
书名原文: Electrical Overstress (EOS): Devices, Circuits and Systems
ISBN 978-7-111-52318-5

I. ①过… II. ①沃…②雷… III. ①电子元件 - 过电流保护 - 研究
②电子元件 - 过电压保护 - 研究③电子器件 - 过电流保护 - 研究④电子器
件 - 过电压保护 - 研究 IV. ①TN60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 295881 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: 朱 林

责任校对: 樊钟英 封面设计: 马精明

责任印制: 乔 宇

北京中兴印刷有限公司印刷

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 19.25 印张 · 375 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-52318-5

定价: 79.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书系统地介绍了过电应力(EOS)器件、电路与系统设计,并给出了大量实例,将EOS理论工程化。主要内容有EOS基础、EOS现象、EOS成因、EOS源、EOS物理及EOS失效机制,EOS电路与系统设计及EDA,半导体器件、电路与系统中的EOS失效及EOS片上与系统设计。

本书是作者半导体器件可靠性系列书籍的延续。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。随着纳米电子时代的到来,本书是一本重要的参考书,同时也是面向现代技术问题有益的启示。

本书主要面向需要学习和参考EOS相关设计的工程师,或需要学习EOS相关知识的微电子科学与工程和集成电路设计专业高年级本科生和研究生。

译者序

当今电子工业中，迫切需要理解 EOS 源、识别 EOS 并提供 EOS 可靠的产品。本书是微电子技术领域中系统性地将 EOS 和 ESD 产品鲁棒技术与方法一起探讨的专业书籍。为了推动中国在电子产品可靠性研究及 EOS 保护领域的发展，使国内更多的设计人员与高等院校学子了解 EOS 领域，在机械工业出版社的大力支持下，由华中科技大学在 EOS 领域长期从事一线研究的教师们组织并完成本书的翻译工作，将一本 EOS 保护领域的设计参考书籍奉献给读者。

本书既总结了已有的文献资料论述的相关 EOS 物理、器件、电路与系统的基础知识，又系统地介绍了 EOS 器件、电路与系统设计，并给出了大量实例，将 EOS 理论工程化。它是一本自成体系的、理论性及实践性较强的专著。

本书是 EOS 器件、电路与系统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学生及研究生的参考书。

本书由雷鑑铭负责组织并完成全书主要的翻译工作。参与本书翻译工作的还有郭君辉、唐灏溟、胡贝贝、孙帆及梅胜坤等。本书在翻译过程中得到了华中科技大学邹雪城教授、邹志革副教授、余国义高级工程师及电子科技大学刘志伟副教授的帮助及支持，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。

EOS 器件、电路与系统涉及的专业面广，鉴于译者水平有限，书中难免有不足及疏漏之处，敬请广大读者批评指正和谅解，在此表示衷心的感谢。

译者

2016 年 1 月于华中科技大学喻园

作者简介

Steven H. Voldman 博士由于在 CMOS、SOI 及 SiGe 工艺下的静电放电 (ElectroStatic Discharge, ESD) 保护方面所作出的贡献, 而成为了 ESD 领域的第一位 IEEE Fellow。

他于 1979 年在布法罗大学获得工程学学士学位, 并于 1981 年在麻省理工学院 (MIT) 获得了电子工程专业第一个硕士学位, 后来又在 MIT 获得第二个电子工程学位 (工程硕士学位); 1986 年他在 IBM 的驻地研究员计划的支持下, 从佛蒙特大学获得了工程物理学硕士学位, 并于 1991 年从该校获得电子工程博士学位。

他作为 IBM 研发团队的一员已经有 25 年了, 主要致力于半导体器件的物理、器件设计和可靠性 (如软失效率、热电子、漏电机理、闩锁、ESD 和 EOS) 的研究工作。Voldman 博士参与到闩锁技术的研发已经有 30 年之久。他的工作主要针对用于双极型 SRAM、CMOS DRAM、CMOS 逻辑、SOI、BiCMOS、SiGe、RFCMOS、RF SOI、智能电源和图像处理技术中的工艺和产品研究。在 2007 年, 他成为 Qimonda DRAM 研发团队的一员, 从事 70nm、58nm 和 48nm CMOS 工艺的研究。2008 年, 他初创了一个有限责任公司, 并作为 TSMC (台积电) 45nm ESD 和闩锁开发团队的一部分在其总部中国台湾新竹工作。2009 年至 2011 年, 他作为 ESD 和闩锁研发高级首席工程师效力于 Intersil 公司。从 2011 年起, 他独立运营一有限责任公司, 主要提供咨询、教学和专利诉讼专家证人的支持。当前他也是韩国三星电子公司 20nm 以下工艺的顾问。

Voldman 博士从 1995 年到 2000 年任美国半导体制造技术战略联盟 (SEMATECH) ESD 工作组主席。他的小组主要致力于 ESD 技术的基准量化, 第一个传输线脉冲标准开发、策略计划, 以及 JEDEC - ESD 协会标准和人体模型标准的协调工作。从 2000 年到 2010 年, 作为 ESD 协会 TLP 和 VF - TLP 工作组的主席, 他的小组主要负责首个 TLP 和 VF - TLP 的规范和标准的建立。Voldman 博士还是 ESD 协会董事会和教育委员会的一员。

Voldman 博士开启了“ESD 在校园”计划, 为国际上许多大学的教职员和学生带去了 ESD 的讲座和互动交流。目前, 已经在美国、新加坡、马来西亚、菲律宾、泰国、韩国、印度和中国等 40 余所大学开展关于 ESD 在校园项目。

Voldman 博士在美国、中国、新加坡、马来西亚、斯里兰卡和以色列等进行 ESD、闩锁和相关专利及发明的短期授课和培训。他在 ESD 和 CMOS 闩锁领域获

得了 245 项美国专利。

自 2007 年起，他作为专家证人效力于 CMOS 开发、DRAM 开发、SOI、半导体器件、ESD 及门锁等方面的专利诉讼案件达 6 起。

Voldman 博士还在《科学美国人》杂志上撰写了多篇文章，并且是第一位撰写 ESD、门锁和 EOS 方面系列书籍的作者。他撰写的书籍包括《ESD 物理与器件》《ESD 电路与器件》《ESD 射频技术与电路》《门锁》《ESD 失效机制与模型》《ESD 设计与综合》《ESD 揭秘：静电防护原理和典型应用》，以及本书。同时他也是《硅锗工艺、模型与设计》和《纳米电子学：纳米线、分子电子学与纳米器件》这两本书部分章节的撰稿人。另外，他的《ESD 电路与器件》和《ESD 射频技术与电路》（中文翻译版）也即将出版。

原书前言

当今电子工业中，迫切需要理解 EOS 源、识别 EOS 并提供 EOS 可靠产品。由于制造业的不断发展，半导体网络规模和系统不断变化，可靠性的需求及 EOS 鲁棒产品也在不断变化。本书就是将基本 EOS 现象与当今真实世界环境联系起来。

鉴于有意义的书籍就是在今天对于片上 ESD 设计的教授也是有用的，本书就是使读者对 EOS 有一个基本的了解。对于专家、非专家、非技术人员及普通人，了解当今世界问题也是有必要的。今天，我们周围的现实世界的 EOS 问题无处不在，会发生在制造环境、电源、机械、执行器、电磁阀、电烙铁、电缆和照明各行各业中。当有开关、接地不良，接地回路，噪声和瞬变现象时，将会在 EOS 器件和印制电路板上产生一个电势。因此，对于专家及非专家，都需要了解并处理身边的 EOS 问题，进而避免它。

围绕该主题的第一个关键问题是观念，EOS 难以量化和定义。在 ESD 开发早期，这种看法也是真实的。结果是当今就没有关于 EOS 的教科书，据了解，系统与产品良率效益的较显著的百分比是与 EOS 相关的。

第二个关键问题是信念，即 EOS 中很难区分的 ESD 失效。但该区分对于定义器件或系统失效的根源很重要。因此，在本书中，将会再次强调。

第三个关键问题是不可能相同的讲座、教程、资源或教科书中将 EOS 和 ESD 鲁棒产品的技术与方法一起探讨。实际情况是关于电磁兼容 (EMC) 和 ESD 的探讨及培训通常是分别讲授的。

本书有多个目标。

1) 讲授 EOS 的基础与概念，以及与它们相关的半导体制造、操作及封装中真实世界中的工序。

2) 为 EOS 量化提供雄厚的技术基础，突出数学和物理分析。在这种方式中，理解热物理作用和关系是至关重要的。

3) 区分 EOS 和 ESD。通过重点关注脉冲波形和时间尺度来实现。本书将不断通过从源到数学模型来强化它们之间的差异。

4) 讨论与其他学科的交叉，如电磁干扰 (EMI)、EMC 和门锁。

5) 向读者揭示 EOS 测试以及半导体芯片和系统的标准。我们将再次区分 EOS 和 ESD 之间的测试和标准，同时揭示如何进行半导体芯片和系统的 EOS 保护。

- 6) 展示如何对半导体芯片和系统同时进行 EOS 和 ESD 事件保护。
- 7) 讲授在不同工艺类型 (如数字、模拟功率电子) 下的 EOS 问题。
- 8) 要突出电子设计自动化 (EDA) 方法设计 EOS 鲁棒性产品。我们将再次明确区别 EOS、ESD 和门锁的 EDA 解决方案。
- 9) 从测量到审核, 讨论制造环境相关的 EOS 项目管理, 以确保 EOS 保护区。
- 10) 初步了解当前和未来的新的纳米结构和纳米系统, 同时提供对未来需求的洞察, 以及在未来数年中对 EOS 关注的程度。

本书将包含如下内容:

第 1 章简要介绍 EOS 相关的基础与术语。在第 1 章中, 奠定了 EOS 基础。第 1 章开启了 EOS 定义以及和其他现象的关系 (如 ESD、EMI、EMC 和门锁) 的对话。在我们的讨论中, 重点是从 ESD 区分 EOS。因此, 将通过本书区别失效分析、时间常数与其他识别和分类的手段的差异。同时也强调了定义 EOS 中安全工作区 (SOA) 及其作用的计划。

在第 2 章中, 介绍理解 EOS 的数学及物理基础。本章的目标是阐述功率失效、时间常数及材料相关的数学和物理模型。本章将提供必要的工具了解方程和过去推导的电热模型的物理限制。本章的关键点是, ESD 时域将从 EOS 时域中分出, 提请注意这些处理中区分功率失效的解决方案。进行深入讨论的主要原因是为了表明 EOS 现象能够进行量化和理解——要针对怀疑论者, 他们认为这种量化不是一门科学。

在第 3 章中, 本书重点将回到 EOS 相关的源和失效机制实践探讨。EOS 源包括机械、电磁阀、执行器、电缆和照明。区别来自元器件的失效、焊盘、键合线、封装等 EOS 失效机制。在这一章中, 对于来自 ESD 的 EOS 特定失效也将给予关注。

第 4 章重点关注 EOS 失效机制和失效分析。本章简要介绍失效分析过程、失效分析技术和工具。同时展示了通过不同的失效分析工具得到的 ESD 和 EOS 失效结果的实例。

在第 5 章中, 将讨论 EOS 和 ESD 测试技术和测试标准。EOS 测试方法包括系统级测试 (如 IEC 61000-4-2) 和与 EOS 有关的瞬态浪涌标准 (IEC 61000-4-5)。本章还探讨 ESD 测试实验和标准, 如人体模型 (HBM)、机器模型 (MM)、充电装置模型 (CDM)、传输线脉冲 (TLP) 和超快传输线脉冲 (VF-TLP) 以及系统测试。系统级测试开始向 EOS 现象过渡 (例如, 电缆放电事件和 CDE), 因此测试将是我们讨论的一部分。

第 6 章将针对不同的半导体工艺 (从 CMOS、双极型、LDMOS 到 BCD) 中的 EOS 以及不同的应用空间产生的问题展开讨论。关注点主要是什么技术可以

解决功率与 EOS 鲁棒性的问题。

EOS 设计是第 7 章的重点。一个关键的问题是如何区分 ESD 设计与 EOS 设计；另一个关键的问题是在给定的芯片或系统中怎样同时实现 ESD 设计和 EOS 设计。本章包括产品定义、规格、技术特征到自顶向下和自底向上的设计方法、布局规划，同时也展示了处理过电流及过温控制电路设计的用处。

在第 8 章中，将讨论 EOS 保护器件。这些包括转折器件与电压触发器件等。采用瞬态电压抑制器 (TVS)、晶闸管浪涌保护器件 (TSPD)、金属氧化物压敏电阻 (MOV)、导电聚合物、气体放电管 (GDT)、熔断器、断路器和和其他器件实现 EOS 保护。这些 EOS 保护器件与那些用于 ESD 的保护器件有明显差别。

在第 9 章中，讨论了系统级的问题和解决方案。重点是量产与制造环境中的 EOS 控制。本章讨论预防行动、后端工艺控制及产品区域操作。

在第 10 章中，讨论了 EOS 的 EDA 技术与方法。采用设计规则检查 (DRC)、版图与原理图对照 (LVS) 及电气规则检查 (ERC) 方法进行 ESD 和 EOS 检查及验证。在本章中，展示了当今应用于 EOS 环境的方法。

在第 11 章中，讨论了 EOS 项目管理流程。本章将展示设计评审、设计检查、纠正措施、审核及设计提交过程等主题，以确保产品的 EOS 鲁棒性。

在第 12 章中，讨论未来结构及纳米器件中的 EOS。本章讨论磁记录、Fin-FET、石墨、碳纳米管及相变存储器的 EOS 问题。本章也对微电机、微镜、RF 微电机开关以及许多新的器件进行了简单介绍。同时对 2.5 维和 3 维系统的硅内插器和硅通孔 (TSV) 中的 EOS 也给予了重点关注。

本书将打开你对 EOS、ESD、EMI 和 EMC 等领域的兴趣，并论述该技术与当今世界的相关性，建立了一个较强的 ESD 保护知识，同时也建议阅读其他图书，如《ESD 揭秘：静电防护原理和典型应用》《ESD 物理与器件》《ESD 电路与工艺》《ESD 射频电路与工艺》《ESD 失效机理和模型》《ESD 设计与综合》《门锁》。

享受本书，享受 EOS 学科，而不要过于强调 EOS。

Baruch HaShem
Steven H. Voldman 博士
IEEE Fellow

致 谢

我要感谢多年来 SEMATECH、ESD 协会、IEEE 和 JEDEC 组织给予我的支持。我还要感谢 IBM 公司、Qimonda (奇梦达) 公司、台积电公司 (TSMC)、Intersil 公司和三星电子公司。我很有幸能与大量的技术小组和许多客户共同工作。我也很有幸能够成为极富创新、智慧和创造力的技术设计团队中的一员。

我要感谢那些允许我在会议、论坛、工业界及大学里授课、开讲座的机构,这为我撰写本书提供了动力。我要感谢一下大学里的教职员们:麻省理工学院 (MIT)、斯坦福大学、中佛罗里达大学 (UCF)、伊利诺伊大学香槟分校 (UIUC)、加州大学河滨分校 (UCR)、布法罗大学、台湾交通大学、清华大学、台湾科技大学、新加坡国立大学 (NUS)、南洋理工大学 (NTU)、北京大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、华中科技大学 (HUST)、电子科技大学 (UESTC)、马来西亚理科大学 (USM)、马来西亚博特拉大学 (UPM)、马来西亚伯乐学院 (KDU)、朱拉隆功大学、马汉科理工大学、泰国国立农业大学、泰国国立法政大学、高丽大学和菲律宾玛布亚科技学院 (MIT)。

我还要感谢在多年来提供给我支持和机会,让我开办讲座、邀请报告和指导的 EOS/ESD、IEEE 可靠性物理国际研讨会 (IRPS)、台湾 ESD 国际会议 (T-ESDC)、国际电子器件会议 (IEDM)、固态电子与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, 以及 IEEE 智能信号处理及通信系统国际会议 (ISPACS) 等。

我还要感谢 22 年来在 ESD 领域的好友: Ming Dou Ker 教授、J. J. Liou 教授、Albert Wang 教授、Elyse Rosenbaum 教授、Timothy J. Maloney、Charvaka Duvvury、Eugene Worley、Robert Ashton、Yehuda Smootha、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、Jeffrey Dunninghoo、Keichi Hasegawa、Teruo Suzuki、Han Gu Kim、Kitae Lee、Nathan Peachey、Kathy Muhonen、Augusto Tazzoli、Gaudenzio Meneghesso、Marise BaFleur、Jeremy Smith、Nisha Ram、Swee K. Lau、Tom Diep、Lifang Lou、Stephen Beebe、Michael Chaine、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、

X 过电应力 (EOS) 器件、电路与系统

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.

我还要感谢 ESD 协会为我在出版界、标准建立和会议活动中提供的支持。同时要感谢出版商和 John Wiley & Sons 的工作人员，帮助我将本书列为 ESD 系列书籍的一部分。

致我的孩子们，Aaron Samuel Voldman 和 Rachel Peshah Voldman，祝你们未来好运。

致我的妻子，Annie Brown Voldman，谢谢你多年来对我的工作的支持。

致我的父母，Carl 和 Blossom Voldman。

Baruch HaShem

Steven H. Voldman博士

IEEE Fellow

目 录

译者序
作者简介
原书前言
致谢

第 1 章 EOS 基本原理	1
1.1 EOS	1
1.1.1 EOS 成本	2
1.1.2 产品现场返回——EOS 百分比	2
1.1.3 产品现场返回——无缺陷与 EOS	3
1.1.4 产品失效——集成电路的失效	3
1.1.5 EOS 事件的分类	3
1.1.6 过电流	5
1.1.7 过电压	5
1.1.8 过电功率	5
1.2 EOS 解密	6
1.2.1 EOS 事件	6
1.3 EOS 源	7
1.3.1 制造环境中的 EOS 源	7
1.3.2 生产环境中的 EOS 源	8
1.4 EOS 的误解	8
1.5 EOS 源最小化	9
1.6 EOS 减缓	9
1.7 EOS 损伤迹象	10
1.7.1 EOS 损伤迹象——电气特征	10
1.7.2 EOS 损伤迹象——可见特征	10
1.8 EOS 与 ESD	11
1.8.1 大/小电流 EOS 与 ESD 事件比较	12
1.8.2 EOS 与 ESD 的差异	12
1.8.3 EOS 与 ESD 的相同点	14
1.8.4 大/小电流 EOS 与 ESD 波形比较	14
1.8.5 EOS 与 ESD 事件失效损伤比较	14

XII 过电应力 (EOS) 器件、电路与系统

1.9 EMI	16
1.10 EMC	16
1.11 过热应力	17
1.11.1 EOS 与过热应力	17
1.11.2 温度相关的 EOS	18
1.11.3 EOS 与熔融温度	18
1.12 工艺等比例缩小的可靠性	19
1.12.1 工艺等比例缩小可靠性与浴盆曲线可靠性	19
1.12.2 可缩放的可可靠性设计框	20
1.12.3 可缩放的 ESD 设计框	20
1.12.4 加载电压、触发电压和绝对最大电压	20
1.13 安全工作区	21
1.13.1 电气安全工作区	22
1.13.2 热安全工作区	22
1.13.3 瞬态安全工作区	22
1.14 总结及综述	23
参考文献	24
第 2 章 EOS 模型基本原理	30
2.1 热时间常数	30
2.1.1 热扩散时间	30
2.1.2 绝热区时间常数	31
2.1.3 热扩散区时间常数	32
2.1.4 稳态时间常数	32
2.2 脉冲时间常数	32
2.2.1 ESD HBM 脉冲时间常数	32
2.2.2 ESD MM 脉冲时间常数	33
2.2.3 ESD 充电器件模型脉冲时间常数	33
2.2.4 ESD 脉冲时间常数——传输线脉冲	33
2.2.5 ESD 脉冲时间常数——超快传输线脉冲	34
2.2.6 IEC 61000-4-2 脉冲时间常数	34
2.2.7 电缆放电事件脉冲时间常数	34
2.2.8 IEC 61000-4-5 脉冲时间常数	35
2.3 EOS 数学方法	35
2.3.1 EOS 数学方法——格林函数	35
2.3.2 EOS 数学方法——图像法	37
2.3.3 EOS 数学方法——热扩散偏微分方程	39
2.3.4 EOS 数学方法——带变系数的热扩散偏微分方程	39

2.3.5	EOS 数学方法——Duhamel 公式	39
2.3.6	EOS 数学方法——热传导方程积分变换	43
2.4	球面模型——Tasca 推导	46
2.4.1	ESD 时间区域的 Tasca 模型	49
2.4.2	EOS 时间区域的 Tasca 模型	49
2.4.3	Vlasov - Sinkevitch 模型	50
2.5	一维模型——Wunsch - Bell 推导	50
2.5.1	Wunsch - Bell 曲线	53
2.5.2	ESD 时间区域的 Wunsch - Bell 模型	53
2.5.3	EOS 时间区域的 Wunsch - Bell 模型	54
2.6	Ash 模型	54
2.7	圆柱模型——Arhipov - Astvatsaturyan - Godovsyn - Rudenko 推导	55
2.8	三维平行六面模型——Dwyer - Franklin - Campbell 推导	55
2.8.1	ESD 时域的 Dwyer - Franklin - Campbell 模型	60
2.8.2	EOS 时域的 Dwyer - Franklin - Campbell 模型	60
2.9	电阻模型——Smith - Littau 推导	61
2.10	不稳定性	63
2.10.1	电气不稳定性	63
2.10.2	电气击穿	64
2.10.3	电气不稳定性与骤回	64
2.10.4	热不稳定性	65
2.11	电迁移与 EOS	67
2.12	总结及综述	67
	参考文献	68
第 3 章 EOS、ESD、EMI、EMC 及门锁		70
3.1	EOS 源	70
3.1.1	EOS 源——雷击	71
3.1.2	EOS 源——配电	72
3.1.3	EOS 源——开关、继电器和线圈	72
3.1.4	EOS 源——开关电源	72
3.1.5	EOS 源——机械设备	73
3.1.6	EOS 源——执行器	73
3.1.7	EOS 源——螺线管	73
3.1.8	EOS 源——伺服电动机	73
3.1.9	EOS 源——变频驱动电动机	75
3.1.10	EOS 源——电缆	75
3.2	EOS 失效机制	76

XIV 过电应力 (EOS) 器件、电路与系统

3.2.1 EOS 失效机制: 半导体工艺—应用适配	76
3.2.2 EOS 失效机制: 绑定线失效	76
3.2.3 EOS 失效机制: 从 PCB 到芯片的失效	77
3.2.4 EOS 失效机制: 外接负载到芯片失效	78
3.2.5 EOS 失效机制: 反向插入失效	78
3.3 失效机制——闩锁或 EOS	78
3.3.1 闩锁与 EOS 设计窗口	79
3.4 失效机制——充电板模型或 EOS	79
3.5 总结及综述	80
参考文献	80

第 4 章 EOS 失效分析

4.1 EOS 失效分析	83
4.1.1 EOS 失效分析——信息搜集与实情发现	85
4.1.2 EOS 失效分析——失效分析报告及文档	86
4.1.3 EOS 失效分析——故障点定位	87
4.1.4 EOS 失效分析——根本原因分析	87
4.1.5 EOS 或 ESD 失效分析——可视化失效分析的差异	87
4.2 EOS 失效分析——选择正确的工具	91
4.2.1 EOS 失效分析——无损检测方法	92
4.2.2 EOS 失效分析——有损检测方法	93
4.2.3 EOS 失效分析——差分扫描量热法	93
4.2.4 EOS 失效分析——扫描电子显微镜/能量色散 X 射线光谱仪	94
4.2.5 EOS 失效分析——傅里叶变换红外光谱仪	94
4.2.6 EOS 失效分析——离子色谱法	94
4.2.7 EOS 失效分析——光学显微镜	95
4.2.8 EOS 失效分析——扫描电子显微镜	96
4.2.9 EOS 失效分析——透射电子显微镜	96
4.2.10 EOS 失效分析——微光显微镜工具	97
4.2.11 EOS 失效分析——电压对比工具	98
4.2.12 EOS 失效分析——红外热像仪	98
4.2.13 EOS 失效分析——光致电阻变化工具	99
4.2.14 EOS 失效分析——红外-光致电阻变化工具	99
4.2.15 EOS 失效分析——热致电压变化工具	100
4.2.16 EOS 失效分析——原子力显微镜工具	101
4.2.17 EOS 失效分析——超导量子干涉仪显微镜	102
4.2.18 EOS 失效分析——皮秒级成像电流分析工具	103
4.3 总结及综述	105

参考文献	106
第 5 章 EOS 测试和仿真	109
5.1 ESD 测试——器件级	109
5.1.1 ESD 测试——人体模型	109
5.1.2 ESD 测试——机器模型	111
5.1.3 ESD 测试——带电器件模型	113
5.2 传输线脉冲测试	114
5.2.1 ESD 测试——传输线脉冲	115
5.2.2 ESD 测试——超高速传输线脉冲	117
5.3 ESD 测试——系统级	118
5.3.1 ESD 系统级测试——IEC 61000 - 4 - 2	118
5.3.2 ESD 测试——人体金属模型	118
5.3.3 ESD 测试——充电板模型	119
5.3.4 ESD 测试——电缆放电事件	120
5.4 EOS 测试	122
5.4.1 EOS 测试——器件级	122
5.4.2 EOS 测试——系统级	123
5.5 EOS 测试——雷击	123
5.6 EOS 测试——IEC 61000 - 4 - 5	124
5.7 EOS 测试——传输线脉冲测试方法和 EOS	125
5.7.1 EOS 测试——长脉冲 TLP 测试方法	125
5.7.2 EOS 测试——TLP 方法、EOS 和 Wunsch - Bell 模型	125
5.7.3 EOS 测试——对于系统 EOS 评估的 TLP 方法的局限	125
5.7.4 EOS 测试——电磁脉冲	126
5.8 EOS 测试——直流和瞬态闩锁	126
5.9 EOS 测试——扫描方法	127
5.9.1 EOS 测试——敏感度和脆弱度	127
5.9.2 EOS 测试——静电放电/电磁兼容性扫描	127
5.9.3 电磁干扰辐射扫描法	129
5.9.4 射频抗扰度扫描法	130
5.9.5 谐振扫描法	131
5.9.6 电流传播扫描法	131
5.10 总结及综述	134
参考文献	134
第 6 章 EOS 鲁棒性——半导体工艺	139
6.1 EOS 和 CMOS 工艺	139