



WILEY

ESD RF Technology and Circuits

# 射频技术与电路

[美] Steven H. Voldman 著  
杨立吾 魏 琰 王西宁 等译

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# ESD 射频技术与电路

ESD RF Technology and Circuits

【美】Steven H. Voldman 著

杨立吾 魏 琰 王西宁 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是 Steven H. Voldman 教授所著的《ESD RF Technology and Circuits》的中文翻译版，全书系统地介绍了射频 ESD 设计的基础知识及概念；射频 ESD 设计合成及方法论的细节，如代换、消除等射频 ESD 设计方法和阻抗隔离等 ESD 技术；RF CMOS ESD 保护元件，并分别从射频和 ESD 的角度对静电防护策略上的异同进行了比较；RF CMOS 静电防护电路；ESD 和双极工艺；锗硅半导体、碳锗硅和静电防护；砷化镓、镓砷及其静电防护技术；双极电路及其静电防护；静电防护设计方法；非半导体类的静电防护解决方案以及芯片外的静电保护技术与观念。

本书为作者的 ESD 系列专著的第二本，对于专业集成电路设计和射频 ESD 领域工程师具有很高的参考价值。本书可以作为工艺、质量、可靠性和误差分析工程师的工具书，也可作为微电子学和集成电路设计专业高年级学生和研究生的参考书。

ESD: RF Technology and Circuits, Steven H. Voldman  
Copyright©2006, John Wiley & Sons Ltd.

All rights reserved. This translation published under license.  
Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予电子工业出版社。未经许可，不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字：01-2008-2150

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

ESD 射频技术与电路 / (美) 沃尔德曼 (Voldman, S.H.) 著；杨立吾等译 .—北京：电子工业出版社，2011.4  
书名原文：ESD RF Technology and Circuits  
ISBN 978-7-121-13207-0

I. ①E... II. ①沃... ②杨... III. ①射频电路 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 053128 号

责任编辑：田宏峰 特约编辑：牛雪峰

印 刷：北京中新伟业印刷有限公司  
装 订：

出版发行：电子工业出版社  
北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：19.75 字数：500 千字

印 次：2011 年 4 月第 1 次印刷

册 数：5 000 册 定价：59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

## 前 言

工程界对电极静电释电（放电）（Electrostatic Discharge, ESD）现象的了解已有时日，但近来在射频应用中所遇见的在无线电频率（射频）范围内静电释电（放电）过程中引起的技术问题，更深一层引发了探讨。

ESD 的现象为何在目前的 RF 领域又变成热门话题了呢？

早期的远距离（无线电）通信始于 William Cooke 及 Charles Wheatstone 研究的电报技术，并于 1838 年开始商业化。但技术发展迅速被 Samuel Morse 于 1844 年推出的“莫尔斯码”取代。莫尔斯码将早期电报的复杂度简化成点集和短线集，并专注于接收机端的聆听。到了 1906 年，Lee De Forest 研究出第一个三元素真空管侦测器（检测器），开启了后来“真空管”在无线电波领域的空间。无线通信时代宣告开始。我个人藏书中有不少（被丢弃的）无线电波工程旧书，其中有 Hebert J. Reich 著作的一本老掉牙的书——《电子真空管原理和应用》（*Theory and Applications of Electron Tubes*），书侧上盖着麻省理工学院 24 号楼放射实验室的图书，同时印上了麻省理工研究实验室文件室的印章。挨着的是一本于 1947 出版的《无线电波工程（第三版）》（*Radio Engineering*），该书的作者是大名鼎鼎的 Frederick Emmons Terman。在这本 1947 年教科书的头几页有以下的道歉语句“在出版发行本书的过程中，因受“二战”期间物资材料短缺影响，品质未尽满意，谨此致歉。”在 1947 Terman 教授的新版教科书专注于几个新科技——“电视”及“雷达”的探讨。我还有一套通用电气（GE Company）Donovan Geppert 的著作。在 1951 年由 McGraw-Hill 出版的“电机与电子工程专集”系列的教科书，诸如 Eastman 所著的《真空管基础》（*Fundamental of Vacuum Tubes*），Spangenberg 所著的《真空管》（*Vacuum Tubes*），Johnson 所著的《传输线与网络》（*Transmission Line and Networks*），Kraus 所著的《天线》（*Antennas*），以及其他在电机工程中新发展项目的书籍。

在 20 世纪 70 年代末期，我是麻省理工学院（MIT）电子研究实验室（RLE）的一名研究生。我们的资料来自“放射实验室时代”，当然同时接了不少微波仪器。老的“射频实验室”依然屹立在 MIT 校园，楼内有不少精密机械技师及特殊的玻璃真空专家，他们过去与真空管技术一起成长。长江后浪推前浪，一代新人换旧人，如今微波时代已风华早逝，当年的俊彦也已完全退休。早年对无线电波及微波的研究热诚随着科技知识的成熟已不复存在。

但是在半导体国防应用的圈子里，微波半导体的研发一直持续，其中包括大部分微波半导体器件在高速通信及雷达应用上。在 1978 年，我正在水牛城大学（University of Buffalo），我的电路学老师——惠伦教授（J. J. Whalen）当时的研究专项是微波器件的功率失效，而且也开始和 ESD 工程师一起研究 ESD 的鲁棒性，同时静电放电学会（Electrostatic Discharge Association）也刚刚成立。

在过去的十到二十年间，所发表的研发成果着重于 III-V 族化合物半导体器件 ESD 的鲁棒性，主要集中于砷化镓半导体。其他创新型的器件，诸如碳化硅及锗硅或更新创的器件等，也在同一时期研发出来了。直到最近，这些原来限于特殊应用的半导体器件也已进

入主流市场的应用，因此，对 ESD 研究的热度也得到进一步的提升。例如，虽然锗硅晶体管从 1980 年中期发展以来，大约到 2000 年前后，一直没有看到在这种异质结双极晶体管 ESD 性能的测试报告。在 2000 年时，我在国际可靠性物理研讨会（IRPS）中第一次提出了讨论锗硅晶体管 ESD 的论文。更令人惊异的是，直到最近 CMOS 工艺——工业界的主流，在达到射频应用的水准后，才引起业界专家们关注于 ESD 的效能，并兼顾到器件在射频应用时仍保持原有功能。直到 21 世纪的开始，学术界及工业界才对这些从特殊应用市场扩展到主流市场的各种先进器件加速了 ESD 的研究，并促进了许多应用的大规模生产。

2001 年 10 月 10 日，我在美国俄勒冈州波特兰市的会议中心主持了一个长达 3 小时的训练课程，题目是“ESD 与射频设计”，该课程引起了参与者的兴趣，学员主要分为两组，一组是具有 ESD 专长的工程师，想要深入了解射频设计；另一组学员则是射频工程师，希望能学习到 ESD 在射频电路上的应用。两组不同背景的学员在工作上的思维方法及创新过程大体相同，其中包括了实验、创新、发明、调配及求精等步骤。两组学员均希望加深他们感兴趣的讨论内容，让课程延长至 4~5 小时或甚至全天。很不幸，当时（2001 年）很少有文献报道 ESD 有关的技术内容，对砷化镓、锗硅、含碳锗硅、磷化铟、碳化硅，以及对 ESD 有关的电路创新、设计技术、实验结果、合成及相关的 ESD 的解决方案尤其缺乏。

在此时刻，出版商 John Wiley & Sons 意识到该领域的重要性，邀请作者写一本与射频技术有关的 ESD 专题著作。当时作者虽然意识到业界对射频 ESD 的兴趣已渐趋普遍，但有关的研发工作仍处初期开展阶段；参考文献、发明专利等均不够完整。因此作者将本书的专题“ESD 射频技术与电路”延后于在射频 ESD 领域相对成熟时再著书。作者同时提出了一整套 ESD 专题书系，第一册为《ESD 物理与器件》，第二册为《ESD 电路与器件》，直到工业界进步到了必要阶段才开始论述探讨第三册——《ESD 射频技术与电路》。

在此期间，作者在诸多 ESD 技术讨论会上开启了一章专注于无线电射频元件 ESD 的技术讨论。

另外，为了促进研发人员在这一新领域的成长，作者在 EOS/ESD 技术研讨会组织中增设了射频 ESD 小组委员会。在一个新的学术及技术领域提供一个让射频 ESD 基础论文能发表并讨论交流的环境，是极其重要的。经过三年多的时间，初期的基础观念论文及研究成果也已渐趋成熟。

第一册专集——《ESD 物理与器件》，主要是写给半导体器件应用物理学家、电路设计工程师、半导体工程师、材料科学家、化学家、物理学家、应用数学家、半导体领域技术管理经理以及 ESD 工程师。第二册专集——《ESD 电路与器件》的主要读者对象是从半导体元件物理学家到电路设计工程师。本书为第三册专集——《ESD 射频技术与电路》，则在于帮助 ESD 工程师与射频电路工程师在半导体器件工艺与电路间取得一个平衡。

在第三册专集中，首要目的是讲述一个设计新领域的基础知识，即我们所谓的“无线电射频兼顾 ESD 设计”基础。为了强调这一新领域的独特性，我们必须先区分射频中的 ESD 与传统数字电路设计中所考虑的 ESD 原则，它们是截然不同的需求。当然，我们更要强调“射频 ESD 设计”也绝不同于“射频设计”。本书的目的是要说明射频技术方法论是如何改变了基本 ESD 的实际操作的。这包含了耦合、去耦、缓冲、镇流、触发、分流和分配，正

如我们在《ESD 电路与器件》中所讨论的。因此，目的是讲述一个新的设计方法——射频 ESD 设计，它包含了诸多方法，如替代法、消除法、负载分配、阻抗隔离以及诸多其他从无线电射频领域中所领会到的 ESD 设计技巧。

在综合了射频 ESD 设计合成与数字电路 ESD 设计重点后，结合 ESD 新的观念将衍生出许多新电路结构及创新成果。在具备了 ESD 的观念后，我们将引导读者学习到更新的射频 ESD 设计实例。

接下来的问题是要弄清楚现有的 ESD 结构是如何影响射频设计的操作的。

本书的第二个目的是借助引用实际电路实例来增强方法论观念，避免导入特殊的基础电路，来建立一套普及性的射频 ESD 实施方案。

目前市面上有许多关于 ESD 的书籍及论文都在讲述特殊电路或器件，但我们的目的是：通过举例来说明射频 ESD 设计的实际操作，这些射频 ESD 的例子取自射频 CMOS，射频 Bipolar，以及射频 BiCMOS 工艺等。

本书的第三个目的是讲述射频 ESD 设计在不同的实际操作步骤中的特性，这些特性包括电路的概念、设计布局、设计工具、测试方法、实际应用和失效标准。

本书的第四个目的是专注于射频工艺及其相关的 ESD 性能。本书提供了工艺的广泛面，从射频 CMOS、锗硅工艺，含碳锗硅工艺及砷化镓工艺；其价值是去寻求工艺对 ESD 结果的影响度、电路设计及解决方案。另外，ESD 所引起的失效机制也是讨论重点。

第五个目的是从宽广的角度来学习如何设计射频 ESD 输入网络、轨到轨电路及射频 ESD 的功率钳制。我们将注意力集中在有关接收器、差分接收器、发射器及其他射频电路有关问题上。本书也将讨论单端及差分网络 ESD 的同异性，以及探求匹配网络和无源器件改变 ESD 网络的鲁棒性。主要目的之一是研究这些特殊电路类的可能失效机制，以及从各种可能不同的电路拓扑变化来寻求 ESD 的解决方案。

第六个目的是使读者了解射频 ESD 的准备工作。通过充分的准备，读者可以完整地了解对射频保护电路测试方法、功率失效关系、物理模型、功率失效热电模型。

第七个目的是带领读者进入 ESD 领域的专利艺术。从研读专利艺术中可以获知 ESD 领域的研究成果。无论是早先的研发成果，还是与教学有关的 ESD 方法论，都涉及许多专利。

本书包括以下内容：

第 1 章将介绍射频 ESD 设计的基础知识及概念。我们由射频 ESD 设计方法的独特性讨论开始，逐步对诸如代换、消除、分路、匹配，以及设计线路布局的实际操作等分别讨论。在第 1 章内我们要复习 ESD 脉冲现象的发生过程及其模式，以及 ESD 发生的相对时序和其时间长短。在不同的射频工艺中，如 RF CMOS、砷化钾和锗硅等的 ESD 失效机制及射频标准和射频 ESD 测试方法。对近年来有关射频 ESD 的结构、电路、射频工艺及射频 ESD 设计方法论的专利做了简要的讨论，以供读者参考。

我们将在第 2 章中讨论射频 ESD 设计合成及方法论的细节，诸如代换、消除等射频 ESD 设计方法和阻抗隔离等 ESD 技术。线性度和 ESD 器件是重点讨论范围。此外，本章更强调将数字、模拟和射频电路合成于一个半导体芯片上进行分析的重要性。

第 3 章将集中讲述 RF CMOS ESD 保护元件，并分别从射频和 ESD 的角度对 ESD 策略上的异同进行了比较。对于 MOSFET、浅沟槽隔离（STI）二极管结构、多晶硅二极管和硅

控整流器 (SCR) 等, 本章将从射频参数、负载电容和 ESD 鲁棒性来进行比较, 讨论重点是 ESD 鲁棒性和射频无源元件 (如电阻、肖特基二极管、电容和电感) 的设计。

第 4 章将讨论 RF CMOS ESD 电路。本章涉及的射频 ESD 电路是由包含无源元件及射频信号输入和输出端匹配网络共同组成的。本章的重点是新的电感/二极管网络、T 型线圈、分布型网络以及其他射频 ESD 电路, 这些网络可以作为第 1、2 章所讨论的射频 ESD 设计方法的一个应用实例。射频 LDMOS 工艺下的 ESD 保护以及射频低噪声放大器 (LNA) 应用的 ESD 设计方法是本章讨论的重点。

第 5 章的重点是 ESD 和双极工艺。本章将讨论同质结和异质结的双极器件物理结构。本章回顾了 ESD 和射频设计的关键性射频参数及感兴趣的指标, 给出了晶体管的电稳定性、热稳定性和射频稳定性, 其他的诸如电旁路与热旁路也将纳入讨论的范围。本章还讨论了 Johnson 极限、击穿电压和晶体管速度的关系以及它们在双极晶体管元件中的重要性, 双极晶体管结构中的 ESD 器件及 ESD 电路均在讨论之列。我们讨论了单发射极、多发射极设计布局 and 发射极、基极、集电极的次序性对 ESD 的影响。

第 6 章中包含了锗硅半导体、碳锗硅和 ESD。在锗硅及碳锗硅异质结双极晶体管的 ESD 测量技术基础中, 对 HBM (人体模型) 和 TLP (传输线脉冲) 的测试组合进行了比较与讨论。本章讨论包括了对于纯硅同质结双极晶体管、锗硅异质结双极晶体管和碳锗硅双极晶体管的从 TLP I-V 测量打破 Wunsch-Bell 功率失效曲线的比较。在锗硅双极晶体管结构中的射-基极、基-集极、集-射极和集-衬底极的应用均有所论述。

第 7 章讨论了砷化镓、铟镓砷及静电保护技术, 复习了早期砷化镓 MESFET 器件的 ESD 测量及失效机制。近代的砷化镓 HBT 器件及有关的人体模式 (HBM) 及 TLP 电流-电压测量也在讨论之列。

第 8 章讨论了双极电路及其 ESD。建构于双极电路基础的信号接收及发射器集成电路将列入讨论的重要议题。还讨论了用于双极工艺的 ESD 的钳位器 (Power Clamps), 它同样适用于硅、锗硅、碳锗硅、砷化镓及磷化铟等工艺技术。钳位器在双极电路及器件中包含了正向偏压和反向偏压击穿触发网络及电容触发网络机制, 而且均包括二极管串触发网络、齐纳击穿触发钳位器和双极三极管器件中的  $BV_{CEO}$  击穿触发钳位器。最后讨论了三阱 ESD 钳位器。

第 9 章主要讨论 ESD 设计方法。虽然在实际应用中, 有多中不同的 ESD 设计方法及操作应用于电子工程, 但本章重点强调单一系统, 即一种特殊的 ESD 设计能促成射频电路与 ESD 设计能同步合成。这种方式的设计思维在半导体集成电路中已被广为采用, 并在射频 CMOS 及锗硅工艺中均获得相当大的成功。集中注意力在此章中所讨论的成功设计方法, 读者将受到启发, 从而在混合信号工艺线上能据客户要求的功能运用自如地完成射频及 ESD 同步设计。

第 10 章主要关注非半导体类的 ESD 解决方案以及芯片外的静电保护技术与观念。我们引用了砷化镓射频器件中常用的火花隙 (Spark Gaps)、空气隙 (Air Gaps) 和场发射器件 (FED) 结构作为例子来讲解。另外, 在封装集成技术中采用的机械式分流解决方案也将列入讨论的范围。本章最后将在砷化镓无线通信手机制造技术中所引用的导电性高分子电子材料防电性促激防护观念作为一个片外非硅非半导体的 ESD 经典解决方案进行了探讨。

本书讨论到射频 ESD 的发展方向及趋势，在由需求引发快速成长的射频 ESD 领域中，器件、电路及其设计在未来可能向不同方向发展，但射频 ESD 的基本观念并没有变化，1~100 GHz 的应用中，不会随着射频器件或特殊电路需求而失效。

在此衷心希望读者喜爱本书及 ESD 研究，仍有很多的东西需要我们不断地学习！

**B”H**

**Steven H.Voldman**

**IEEE Fellow**



## 译者序

本书是译者在上海中芯国际任职期间，领导并鼓励一群对知识技术充满热心的年轻工程师在工作需求及技术发展趋势下，分工完成全书翻译的。这群年轻的工程师们大多数来自长三角附近著名大学的研究院，并在公司射频市场领域及射频设计技术服务部门任职，他们对先进技术知识的热心追求，并与译者同感于中国射频集成电路未来趋势发展所必须具备的知识，共同努力完成此书。这群年轻工程师包括：王西宁博士，来自上海交通大学；魏琰、阮挺和徐文杰，来自浙江杭州电子科技大学；朱彬、岳亚富和陈丹，来自浙江大学；于玮玮，来自东南大学；傅正中，来自北京大学微电子学院；以及他们的技术经理李庭煌先生，来自新加坡，毕业于南洋理工大学。

本书翻译以表达原意为主，因此若干专业名词、译文作者名及参考文献，若不便提供恰当的中文，均附原文。在翻译本书时，正值全球金融风暴，参加翻译工作的工程师作者们特别安排出时间将翻译工作完成，特此致谢，并对延后出书深感歉意。在翻译本书的过程中，由于客观环境的困难以及译者本身的能力，译文难免会出现的错误，敬请科研专家和广大读者们批评指正，若有任何建议敬请直接与译者联系，在此表示衷心的感谢。

在本书的翻译过程中，魏琰，王西宁及徐文杰承担了主要的工作，贡献良多，他们目前均在中芯国际器件工艺研发部门工作。中芯国际的管理层对本书的翻译工作给予了大力支持，在此深表感谢。

本书可以为在射频 ESD 领域的工作人员提供技术参考，也可以选择重要章节作为高校大四本科生及硕士研究生的教材，从而使理论与实际直接结合。

翻译负责人：

杨立吾 中芯国际院士 谨示

lee\_yang@smics.com

hbtlwy@yahoo.com

## 致 谢

我想要感谢的是，那些曾经在我的学术和专业——RF ESD 技术领域的正确道路上帮助过我的人。Buffalo 大学、麻省理工学院（MIT）、Vermont 大学的同事在我的研究方向和感兴趣的领域，如连续介质力学、连续电介质力学、静电学、半导体、场论、系统、电路，以及数学和物理，都有很大的影响。我还要感谢 Buffalo 大学工程科学与物理系和电气工程系在课程方面对热学、力学和电气科学的支持和兴趣，期间有 Irving Shames 教授、Herbert Reismann 教授、Stephen Margolis 教授、J. J. Ahalen 教授、R. K. Kaul 教授和 Reichert 教授和 Buffalo 大学的其他教员，1978 年我在 Buffalo 大学学习第一门电气工程电路时是 J. J. Whalen 的学生，当时他和 Clarkson 学院的 Hank Domingos 教授一起积极地研究微波设备的电源失效和 HBM 测试，以及微波 RF 设备的 ESD 评估的一些首创工作。在麻省理工学院，我要感谢电气工程系、物理系、MIT 等离子融合中心（Plasma Fusion Center）和 MIT 高电压研究实验室（High Voltage Research Laboratory）对等离子物理、电动力学、静电学、微波理论、半导体等方面的支持。正是在 MIT，我第一次接触到微波理论，在等离子物理环境、电源电子和高压设备下使用微波波导诊断系统开展实验。这期间，我置身于从第二次世界大战雷达发展时代建立的 MIT 电子研究实验室的电气工程的教员中，这些教员包括“雷达实验室”的创建者，如 Louis D. Smullin 教授、James R. Melcher 等。正是在这种环境下，我成为了一名实验师，并且和 MIT 的教员们肩并肩地完成了我的培训工作。作为 Louis D. Smullin 教授指导下的一名研究生，我习惯于在假设战争没有结束的状态下进行试验，因为没有时间可以浪费。作为 Melcher 的学生，我被 Melcher 的分析方法影响并被他在学术上的热情陶醉。作为 Jin Au Kong 教授的学生，我努力学习微波理论方面的知识，并从更宽泛的角度学习电动力学。同时我也要感谢 MIT 高电压研究实验室的 Markus Zahn 教授，感谢他对我在高电压分析和实验、写作技巧方面的指导，也感谢他和我分享他的学术观点。以 MIT 研究生的身份参与了教学，我有幸和 Clif Fonstad 教授、David Epstein 教授、Wyatt 教授和 Hank Smith 教授一起参与了电气工程专业高年级本科生的课程（6.012）——半导体器件和电路的教学。在 Vermont 大学，作为最早研究异质结的 R. L. Anderson 教授的学生，我第一次接触到异质结双极型晶体管、III-V 器件和低温学，当时我也没有料到十年后我将是第一个从事硅锗和硅锗碳器件 ESD 保护的研究人员。

在 IBM 工作期间，我有幸认识了来自 IBM Burlington Vermont、IBM East Fishkill、IBM T. J. Watson Research Center、IBM San Jose、IBM Rochester、IBM Haifa Israel 和 IBM RF Boston Design Center 等的许多良师益友。在我早期研究双极型 SRAM 发展的过程中，受到了 Roy Flaker、Jack Gerbach、Russ Houghton、Jeffery Chu、Badih El-Kareh、John Aitken、Tak Ning、Denny Tang、George Sai-Halasz、JackY.-C. Sun 和 Robert Dennard 等人的影响。在 RF CMOS 和 RF BiCOMS 硅锗领域，我非常感谢我的同时在 ESD 工作、构思、设计工具、测量和技术支持等方面的帮助，这些同事有 Louis Lanzerotti、Robb Johnson、Peter Zampardi、Ephrem G. Gebreselasie、Amy Van Laecke、Stephen Ames、Susan E. Strang、donald Jordan、C. Nickolas Perez、David S.Collins、Doug Hershberger、Alan Norris、Arnold Baizley、Bradley

Orner、Michael Zierak、Robert Rassel、Peter B. Gray、Ben T. Voegeli、Q. Z. Liu、J. S. Rieh、John He、Jay Rascoe、Xue Feng Liu、Doug Coolbaugh、Natalie Feilchenfeld、Dawn Wang、J. S. Lee、Stephen St. Onge、Alvin Joseph、James Dunn、David Haramé、Gary Patton 和 Bernard Meyerson。

在 ESD 培训方面，我要感谢许多机构多年来的支持和在 ESD 和闭锁方面提供的演讲、应邀座谈和指导的机会，这些机构包括 SEMATECH ESD 集团、过电压/ESD (EOS/ESD) 研讨会、国际可靠性物理研讨会 (IRPS)、中国台湾 ESD 委员会 (T-ESDC)、国际物理和失效分析 (IPFA) 会议、国际电磁兼容委员会 (ICEMAC)、双极性/BiCMOS 电路和技术会议 (BCTM)、国际固态电子电路会议 (ISSCC)，以及 ESD 协会教育委员会和 ESD 协会器件测试标准委员会。我还要感谢 ESD 协会办公室对该领域内的出版物、标准发展、会议举办的支持，在这里要特别感谢 Lisa Pimpinella。在 RF 器件 ESD 领域，我要感谢 UIUC 的 Elyse Rosenbaum 教授，NCTU 的 Ming-Dou Ker 教授，ST Microelectronics 的 Karl Heinz Bock、Eugene Worley 和 Corrine Richier，Intel 公司的 Patrick Juliano，及 RF MicroDevices 的 Kathy Muhonen，Sami Hynoven。我还要感谢我的暑期实习生以及 ESD 在 RF ESD 领域的支持，他们是 UIUC 的 Patrick Juliano、Princeton 大学的 Brian Ronan 和 Penn State 大学的 Anne Watson，感谢他们的努力工作、协作以及在 ESD 和闭锁实验的参与和发现。要特别感谢 Ephrem G. Gebreselasie 在 RF COMS 的 ESD 和闭锁，以及在 RF BiCMOS 硅锗发展上的努力工作和大力支持。我还要感谢 John Wiley & Sons 出版社和其在奇彻斯特、中国台湾、新加坡和中国的职员，感谢他们接受第一套 ESD 丛书。

我最要感谢的是我的孩子，Aaron Samuel Voldman 和 Rachel Peshah Voldman，我的妻子 Annie Brown Voldman，以及我的父母 Carl 和 Blossom Voldman。愿我们能实现我们想要的生活，并一起生活在公正、正义和真理的道路上。

Baruch Hashem...

B'H

Dr. Steven H. Voldman

IEEE Fellow

# 目 录

第 1 章 射频设计和 ESD	1
1.1 ESD 设计的基本概念	1
1.2 射频 ESD 的基本概念	3
1.3 射频 ESD 的主要成果	8
1.4 射频 ESD 的关键专利	10
1.5 ESD 失效机制	10
1.5.1 射频 CMOS ESD 失效机制	10
1.5.2 锗硅器件的 ESD 失效机制	11
1.5.3 硅锗碳器件的 ESD 失效机制	12
1.5.4 砷化镓技术 ESD 失效机制	12
1.5.5 铟镓砷 ESD 失效机制	12
1.5.6 射频双极型电路 ESD 失效机制	13
1.6 射频基础	13
1.7 双端口网络参数	16
1.7.1 Z 参数	16
1.7.2 Y 参数	16
1.7.3 S 参数	16
1.7.4 T 参数	17
1.8 稳定性：射频设计稳定性与 ESD	18
1.9 器件性能退化和 ESD 失效	19
1.9.1 ESD 导致的直流参数漂移和失效标准	19
1.9.2 射频参数、ESD 退化以及失效标准	20
1.10 射频 ESD 测试	21
1.10.1 ESD 测试模型	21
1.10.2 射频最大功率失效和 ESD 脉冲测试方法	24
1.10.3 ESD 导致的射频退化和 S 参数评估测试方法	26
1.11 ESD 测试中时域反射计 (TDR) 和阻抗方法学	28
1.11.1 时域反射 (TDR) ESD 测试系统评估	29
1.11.2 ESD 退化系统级方法——眼图测试	31
1.12 产品级 ESD 测试和射频功能性参数失效	33
1.13 组合射频和 ESD TLP 测试系统	34
1.14 小结	36
习题	37
参考文献	38

<b>第 2 章 射频 ESD 设计</b> .....	46
2.1 ESD 设计方法：理想 ESD 网络和射频 ESD 设计窗口 .....	46
2.1.1 理想 ESD 网络和电流-电压直流设计窗口 .....	46
2.1.2 理想 ESD 网络频域设计窗口 .....	47
2.2 射频 ESD 设计方法：线性法 .....	48
2.3 射频 ESD 设计：无源元件品质因数和品质因素 .....	51
2.4 射频 ESD 设计方法：替代法 .....	53
2.4.1 无源器件替代 ESD 网络器件法 .....	53
2.4.2 ESD 网络元件替代为无源元件 .....	53
2.5 射频 ESD 设计方法：匹配网络和射频 ESD 网络 .....	54
2.5.1 射频 ESD 方法：匹配网络转换为 ESD 网络 .....	54
2.5.2 射频 ESD 方法：ESD 网络转换为匹配网络 .....	56
2.6 射频 ESD 设计方法：电感分流器 .....	58
2.7 射频 ESD 设计方法：消除法 .....	60
2.7.1 品质因数和消除法 .....	60
2.7.2 电容负载的感性消除和 FOM .....	61
2.7.3 消除法和 ESD 电路 .....	62
2.8 射频 ESD 设计方法：利用 LC 共振的阻抗隔离技术 .....	65
2.9 射频 ESD 设计方法：集总与分布式负载 .....	66
2.9.1 射频 ESD 共面波导的分布负载 .....	67
2.9.2 利用 ABCD 矩阵进行射频 ESD 共面波导分布负载分析 .....	68
2.10 ESD 射频设计综合和平面图：射频、模拟和数字综合 .....	69
2.10.1 同一区域 ESD 电源钳位 (Power Clamp) 的布置 .....	70
2.10.2 电源线的结构和 ESD 设计综合 .....	70
2.10.3 $V_{DD}$ 到 $V_{SS}$ 电源线的保护 .....	71
2.10.4 $V_{DD}$ 到模拟 $V_{DD}$ 和 $V_{DD}$ 到射频 $V_{CC}$ 的保护 .....	72
2.10.5 内部 ESD 保护网络 .....	72
2.11 ESD 电路和射频焊盘整合 .....	73
2.12 键合线焊盘下的 ESD 结构 .....	74
2.13 小结 .....	76
习题 .....	77
参考文献 .....	78
<b>第 3 章 射频 CMOS 和 ESD</b> .....	81
3.1 射频 CMOS：ESD 器件比较 .....	81
3.2 圆形射频 ESD 器件 .....	84
3.3 射频 ESD 设计：ESD 配线设计 .....	85
3.4 射频无源器件：ESD 和肖特基势垒二极管 .....	87
3.5 射频无源器件：ESD 和电感 .....	89
3.6 射频无源器件：ESD 和电容 .....	92

3.6.1	金属-氧化物-半导体和金属-绝缘体-金属电容	93
3.6.2	可变电容和超突变结可变电容	93
3.6.3	金属-层间介质-金属电容	93
3.6.4	垂直平行平面 (VPP) 电容	94
3.7	小结	95
	习题	95
	参考文献	96
<b>第 4 章</b>	<b>射频 CMOS ESD 网络</b>	<b>102</b>
4.1	RF CMOS 输入电路	102
4.1.1	RF CMOS ESD 二极管网络	102
4.1.2	射频 CMOS 二极管串 ESD 保护网络	104
4.2	RF CMOS: 二极管-电感 ESD 网络	106
4.2.1	射频电感-二极管 ESD 网络	107
4.2.2	射频二极管-电感 ESD 网络	108
4.3	射频 CMOS 阻抗隔离 LC 振荡器 ESD 网络	108
4.3.1	射频 CMOS LC-二极管 ESD 网络	109
4.3.2	射频 CMOS 二极管-LC ESD 网络	109
4.3.3	射频 CMOS LC-二极管网络的实验结果	109
4.4	射频 CMOS 低噪声放大器 ESD 设计	110
4.4.1	射频 LNA ESD 设计: 在 $\Pi$ 形结构中的低电阻 ESD 电感和 ESD 二极管钳位元件	111
4.5	射频 CMOS T 形线圈电感 ESD 输入网络	114
4.6	射频 CMOS 分布 ESD 网络	115
4.6.1	射频 CMOS 分布射频 ESD 网络	115
4.6.2	利用串联电感和分流双二极管的射频 CMOS 分布射频 ESD 网络	116
4.6.3	利用串联电感和并联分流 MOSFET 的射频 CMOS 分布射频 ESD 网络	117
4.7	射频 CMOS 分布 ESD 网络: 传输线和共面波导	119
4.8	射频 CMOS: ESD 和射频 LDMOS 功率工艺	121
4.9	射频 CMOS ESD 电源钳位	123
4.9.1	RC 触发 MOSFET ESD 电源钳位	124
4.9.2	高压 RC 触发 MOSFET ESD 电源钳位	125
4.9.3	电压触发 MOSFET ESD 电源钳位单元	126
4.10	小结	127
	习题	128
	参考文献	129
<b>第 5 章</b>	<b>双极型晶体管物理特性</b>	<b>133</b>
5.1	双极型器件的物理特性	133
5.1.1	双极型晶体管电流公式	133
5.1.2	双极型器件的电流增益和集电极与发射极的电荷传输	134
5.1.3	单位电流增益截止频率	134

5.1.4	单位功率增益截止频率	135
5.2	晶体管击穿	135
5.2.1	雪崩倍增击穿	135
5.2.2	双极型晶体管击穿	137
5.3	KIRK 效应	138
5.4	John 限制：晶体管的物理限制	139
5.4.1	电压-频率关系	139
5.4.2	Johnson 电流-频率限制公式	140
5.4.3	Johnson 功率限制公式	140
5.5	射频不稳定性：发射极崩溃	141
5.6	ESD 射频版图设计：发射极、基极和集电极结构	146
5.7	射频 ESD 版图设计：第二发射极的应用（虚设发射极）	148
5.8	射频 ESD 版图设计：发射极负载	151
5.9	射频 ESD 版图设计：热回路和热透镜	152
5.10	基极负载和射频率稳定性	153
5.11	小结	154
	习题	155
	参考文献	155
<b>第 6 章</b>	<b>锗硅和 ESD</b>	<b>159</b>
6.1	异质结和锗硅工艺	159
6.1.1	SiGe HBT 器件	159
6.1.2	SiGe 器件结构	160
6.2	SiGe 物理	161
6.3	碳锗硅	163
6.4	锗硅 ESD 测试	165
6.4.1	SiGe 集-射 ESD 应力	165
6.4.2	SiGe HBT 和 Si BJT 的 ESD 比较	166
6.4.3	集-射应力的 SiGe HBT 电子热 HBM 模型仿真	169
6.5	碳锗硅集-射 ESD 测试	169
6.6	SiGe 晶体管射-基设计	171
6.6.1	外延基区异质结双极型晶体管（HBT）的射-基设计	172
6.6.2	射-基设计 RF 频率性能指标	173
6.6.3	SiGe HBT 射-基电阻模型	174
6.6.4	SiGe HBT 射-基设计和硅化物放置	174
6.6.5	自校准（Self-Aligned）射-基设计	177
6.6.6	非自校准（Non-self aligned）射-基设计	179
6.6.7	碳锗硅 ESD 诱发的 S 参数退化	185
6.6.8	射-基应力的电热仿真	186
6.7	场氧（FOX）绝缘层界定的 SiGe HBT 的 HBM 数据	187

6.8	SiGe HBT 多发射极研究	188
6.9	小结	189
	习题	189
	参考文献	190
<b>第 7 章</b>	<b>砷化镓工艺中的 ESD</b>	<b>196</b>
7.1	砷化镓工艺与 ESD	196
7.2	砷化镓能量失效比和功率失效比	196
7.3	有源和无源单元中的 GaAs ESD 失效	198
7.4	GaAs HBT 器件和 ESD	199
7.4.1	GaAs HBT 器件 ESD 结果	199
7.4.2	GaAs HBT 二极管串	200
7.5	GaAs 基 HBT 的无源单元	201
7.5.1	GaAs HBT 集基结可变电容	201
7.6	GaAs 工艺的失效机制列表	202
7.7	GaInAs 与 ESD	203
7.8	磷化铟 (InP) 与 ESD	204
7.9	小结	204
	习题	204
	参考文献	205
<b>第 8 章</b>	<b>双极型晶体管接收机电路与 ESD 网络</b>	<b>209</b>
8.1	双极型晶体管接收机电路与 ESD 网络	209
8.2	单端共射极接收机电路	209
8.2.1	含直流隔离电容的单端双极型接收机	210
8.2.2	含 ESD 保护和直流隔离电容的单端双极型接收机	211
8.2.3	含反馈电路的单端双极型共发射极接收机电路	211
8.2.4	含射极电阻的单端双极型共发射极接收机电路	212
8.2.5	含巴伦输出的单端双极型共发射极接收机电路	215
8.2.6	单端双极型共射共基接收机电路	215
8.3	双极型差分接收机电路	217
8.3.1	以共发射极形式连接的共射共基双极型接收机电路	218
8.4	双极型晶体管 ESD 输入电路	219
8.4.1	具有二极管结构的双极型晶体管 ESD 输入电路	222
8.4.2	双极型晶体管 ESD 输入电路: 基极电阻接地的双极型晶体管 ESD 输入电路	222
8.5	双极型晶体管 ESD 电源钳位	225
8.5.1	双极型晶体管电压触发 ESD 电源钳位	225
8.5.2	齐纳击穿电压触发 ESD 电源钳位	225
8.5.3	$BV_{CEO}$ 电压触发 ESD 电源钳位	229
8.5.4	混合电压接口正偏电压和 $BV_{CEO}$ 击穿综合的双极型 ESD 电源钳位	233
8.5.5	超低电压正偏电压触发 BiCMOS ESD 电源钳位	236



8.5.6 容性触发 BiCMOS ESD 电源钳位	239
8.6 双极型 ESD 二极管串与三阱电源钳位	240
8.7 小结	240
习题	241
参考文献	242
<b>第 9 章 射频和 ESD 计算机辅助设计</b>	<b>244</b>
9.1 射频 ESD 设计环境	244
9.1.1 静电放电和射频共同分析设计方法	244
9.1.2 ESD 分级 Pcell 物理版图生成	245
9.1.3 ESD 遗传 Pcell 示意图生成	245
9.2 利用遗传参数化单元的 ESD 设计	246
9.2.1 分级 Pcell 图解方法	246
9.2.2 分级 Pcell 电路图方法	248
9.3 基于射频 CMOS 的分级参数化单元 ESD 设计	251
9.4 射频 BiCMOS ESD 多级参数化单元	252
9.4.1 BiCMOS ESD 输入网络	253
9.4.2 BiCMOS ESD 轨到轨	255
9.4.3 BiCMOS ESD 电源钳位	256
9.5 射频 ESD 设计系统的优点与缺点	259
9.6 保护环 p-cell 方法	261
9.6.1 为内部和外部门锁现象设计的保护环	261
9.6.2 保护环理论	262
9.6.3 保护环设计	263
9.6.4 保护环特征	266
9.7 小结	267
习题	268
参考文献	268
<b>第 10 章 可替代 ESD 概念：片上和片外 ESD 保护解决方案</b>	<b>272</b>
10.1 火花隙	272
10.2 场发射器件	274
10.2.1 作为 ESD 保护的场发射器件	274
10.2.2 GaAs 工艺的场发射器件	275
10.2.3 场发射器件的电子钝化效应	275
10.2.4 场发射器件多发射极 ESD 设计	275
10.2.5 场发射器件 (FED) 的 ESD 设计准则	276
10.3 片外保护和片外瞬时抑制器件	276
10.3.1 片外瞬时电压抑制器件 (TVS)	277
10.3.2 片外聚合体电压抑制 (PVS)	278
10.4 封装级机械 ESD 解决方案	279