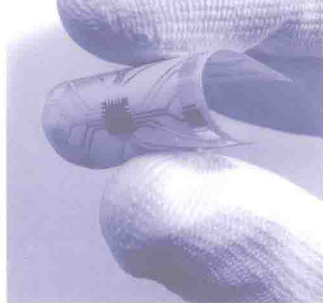




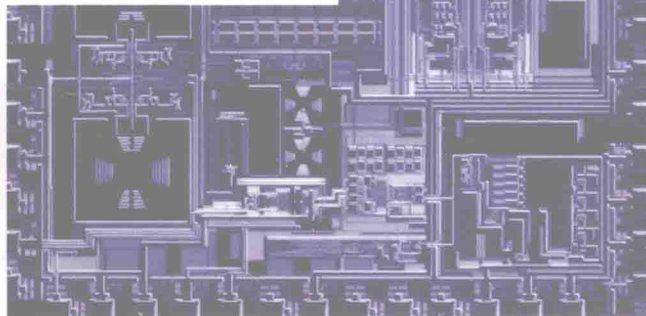
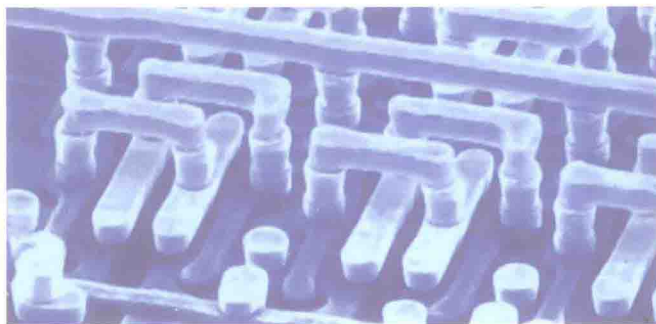
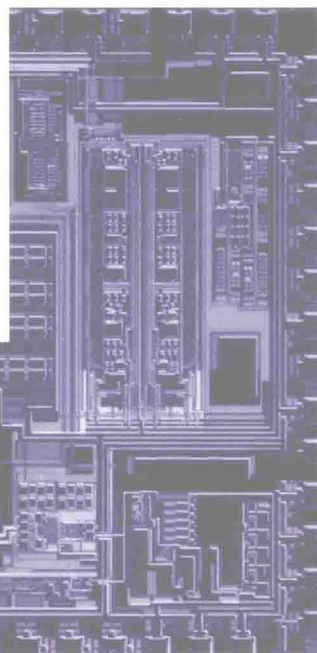
Guide to State-of-the-Art Electron Devices

电子元器件 权威技术指南

(图文版)

IEEE EDS 35周年特别推荐

[德] Joachim N. Burghartz 编著 谭朝晖 译



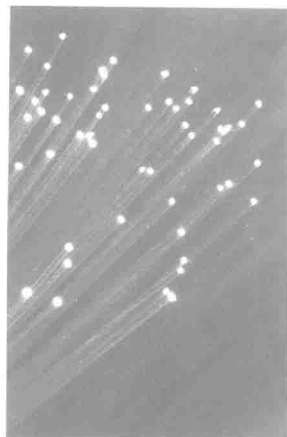
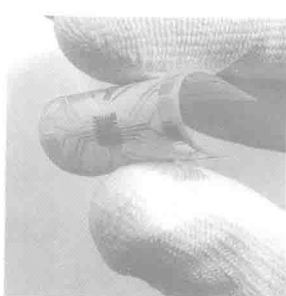
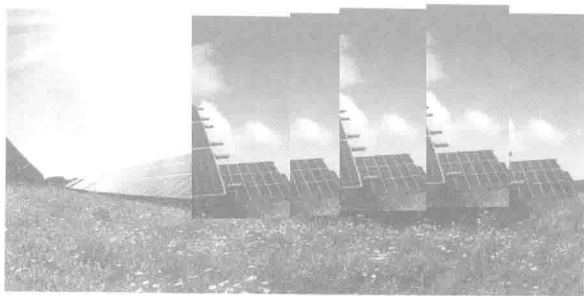
ELECTRON
DEVICES
SOCIETY®

WILEY
wiley.com

IEEE
IEEE PRESS

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

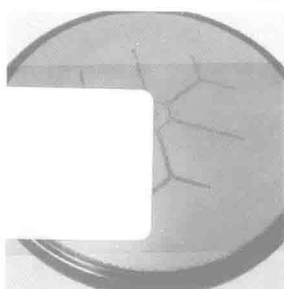
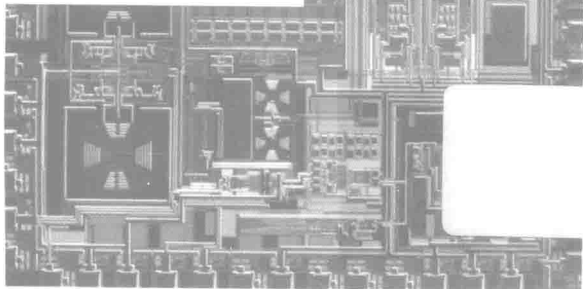
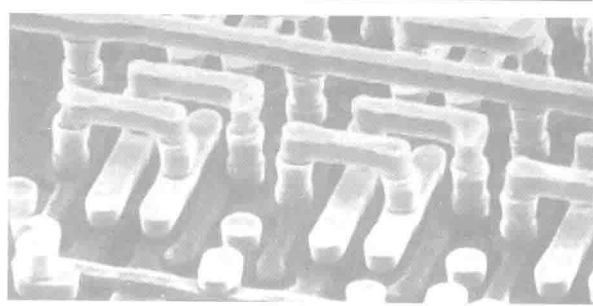
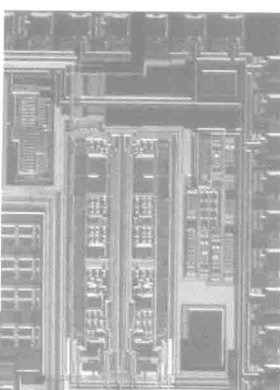
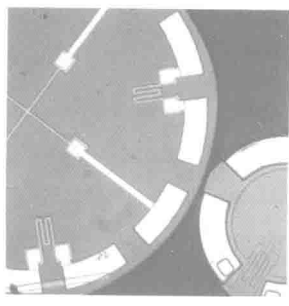


电子元器件 权威技术指南

(图文版)

IEEE EDS 35周年特别推荐

[德] Joachim N. Burghartz 编著 谭朝晖 译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

电子元器件权威技术指南 : 图文版 : IEEE EDS35周年特别推荐 / (德) 约阿希姆·N. 伯格哈特 (Joachim N. Burghartz) 编著 ; 谭朝晖译. — 北京 : 人民邮电出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-115-43092-2

I. ①电… II. ①约… ②谭… III. ①电子元件—指南②电子元器件—指南 IV. ①TN6-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第181246号

版权声明

Copyright © 2013 John Wiley & Sons Ltd.

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition, published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with POSTS & TELECOM PRESS and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder, John Wiley & Sons Limited.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons 授权人民邮电出版社发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

内 容 提 要

本书是IEEE EDS 35周年标志性著作, 是最前沿的电子元器件指南, 由EDS的67位专家成员撰写, 权威性极高, 分享了电子元器件各个领域的专业知识、原理分析和最新研发与应用, 适用于所有对电子学感兴趣的人。

◆ 编 著 [德] Joachim N. Burghartz

译 谭朝晖

责任编辑 紫 镜

执行编辑 魏勇俊

责任印制 周昇亮

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京缤索印刷有限公司印刷

◆ 开本: 800×1000 1/16

印张: 18.5

2016年11月第1版

字数: 391千字

2016年11月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2014-2501号

定价: 129.00元

读者服务热线: (010) 81055339 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

广告经营许可证: 京东工商广字第8052号

前言-1



没有人怀疑电子器件是今天文明的基础。本书介绍了电子元器件的发展历史和历史上的许多技术创新。我非常高兴地看到，IEEE EDS (Electron Devices Society) 克服了重重困难，成功地完成了本书的撰写工作。编辑选择了好作者来面对这样的挑战。我和许多作者有很好的私交，也清楚他们写作时的艰辛和认真。

EDS的兴起和成长都离不开创新。EDS已成为会议和出版界的主要组织。EDS的重要性怎么强调也不过分，因为研究人员通过这个组织发表成果并相互交流，从而催生了很多新的理念。毫不夸张地说，在会议上，有时这种交流就在走廊里进行。这本书的诞生是一个传播信息的优良传统的延续。

本书的每一个章节独立成文，每章都先讲发展历史，随后是相关议题的讨论。这种编排，对于扩展视野的学生和专家都是有益的。我尤其赞赏边框注释部分，里面解释的术语和概念对于缺少相关专业知识的人，非常有帮助。

George E. Smith

说明：George E. Smith是2009年诺贝尔物理奖的获得者，其主要成果是“the invention of an imaging semiconductor circuit—the CCD Sensor (图像半导体电路发明——CCD传感器)”。他还是IEEE Electron Devices Society的著名成员。

前言-2



这本书是IEEE EDS (Electronic Devices Society) 35周年的标志性著作, EDS的历史始于60年前成立的IRE Professional Group on Electron Devices。在书的每页底部, 通过“视频剪辑”可以看到电子元器件的按时间顺序发生的主要技术进步。剪辑的视频反映了电子器件领域先驱者的激情和奉献, 正是这种激情和奉献的精神引导他们发现需要理论研究并最终投入实际应用。这段历史视频的链接、“50Years of Electron Devices”电子小册子, 可以在EDS官网上免费得到。

尽管在晶体管时代之前就有了真空管用于通信, 但1947年的固态三极管、随后在20世纪50年代兴起的集成电路, 才在最近数十年把电子元器件真正推向了计算机、通信和其他新出现的领域。书中描述的这些工作, 改变了我们生活和思维的方式。同样, 人们对高性能电子设备的无止境的期望, 一直在催生新的设备和器件, 全球电子设备行业也在通过新的解决方案不断地响应这样的需求。

本书得到了EDS领军人物的支持、帮助。真诚地希望其中的技术内容能成为现在和未来的桥梁。

Paul Yu

IEEE EDS 主席 2012-2013

序



电子和功率电子技术已成为支撑我们生活、健康、安全、人际交流的基础。今天的工业也离不开电子通信、自动化和控制。通过电子技术，人们保持联系、获得专业领域的支持并享受余暇。运输和能源供应也依赖电子。电子器件负责的信号处理、切换和电子能源转向是电子和功率电子行业的基础。

这本书是最先进的电子元器件简洁的指南，由EDS的67位专家成员撰写。在全书21章中，专家们分享了它们在电子元器件各个领域的专业知识。这些章节描述了各种各样的电子元器件，这种多样性也正是EDS面临的现实。来自产业界、学术界、政府部门的专家对本书也有诸多贡献。作者来自五大洲，这是一个真正世界级的团队，包括了顶级的管理者、年轻的工程师、著名的大学教授和年轻的学者。编辑因此试图保持明显不同的风格，以反映区域、背景和隶属关系的差异。

大部分作者是EDS的14个TAC（技术专业委员会，Technical Area Committee）的成员，这个专委会利用其专业知识帮助执行委员会和管理层做出战略决策。EDS现在的TAC见表1。

1963年成立的IEEE（国际电子电气工程师协会）脱胎于1884年成立的AIEE（美国电子工程师协会）和1912年成立的IRE（无线电工程师协会）。在晶体管发明后不久的1952年，IRE建立了“电子管和固态器件委员会”，在电子器件界颇有影响。1952年，该委员会更名为“IRE电子器件专家组”。随着AIEE和IRE的合并，在1964年成立了“IEEE电子器件组”，1976年该组织更名为EDS（IEEE电子元器件学会）。

所以说，我们今天看到EDS庆祝成立35周年，但它的历史可以追溯到早于EDS 60年的IRE，这是两个庆祝的理由，我们因此给EDS的会员和潜在的会员以可接受的低价提供最先进电子元器件的简要指南。这项工作得到了EDS的大量赞助和其他志愿者的支持和帮助。

		PART III									
		VLSI (Chapter 11-13)	VD (Chapter 19)	PDIC (Chapter 15)	PD (Chapter 16)	OE (Chapter 20)	OD (Chapter 17)	NT (Chapter 21)	MEMS (Chapter 18)	CSDC (Chapter 14)	
PART II	CM (Chapter 7)	●●●	●	●	●	●●	●●	●●	●●	●●	
	DRP (Chapter 9)	●●●	●●	●●●	●●●	●●	●●●	●	●●	●●	
	EM (Chapter 6)	●●●	●●	●●	●●	●●●	●●	●●●	●●	●●●	
	SM (Chapter 10)	●●●	●●	●●●	●●●	●	●●●	●	●●	●●	
	TCAD (Chapter 8)	●●●	●	●●●	●●	●	●●	●	●●●	●●	

图1 IEEE EDS的TAC和书中的第Ⅱ、Ⅲ部分的关系

表1 IEEE EDS的技术专业委员会

Compact Modeling	CM
Compound Semiconductor Devices and Circuits	CSDC
Device Reliability Physics	DRP
Electronics Materials	EM
Microelectromechanical Systems	MEMS
Nanotechnology	NT
Optoelectronic Devices	OD
Organic Electronics	OE
Photovoltaic Devices	PD
Power Devices and ICs	PDIC
Semiconductor Manufacturing	SM
Technology Computer Aided Design	TCAD
Vacuum Devices VLSI Technology and Circuits	VLSI

本书由3部分组成，第Ⅱ部分（5章）和第Ⅲ部分和EDS的TAC关系紧密（见图1）。第Ⅰ部分介绍了电子元器件的基础。在所有章节里的边框条说明了特殊电子元器件的指标体系和概念，以方便快速地了解相关内容。

全书的一个亮点是反映了电子器件的发展历史。这段历史大体可分为：1952年之前、

1952年到1976年、1976年之后，这和电子器件的早期发展、IRE、EDS的发展历程基本吻合。

当然，还有很多幕后英雄推动了这本书的诞生。在“鸣谢”部分，一并向他们表示感谢。

Joachim N. Burghartz

对本书有贡献的人

- **David K. Abe**, Naval Research Laboratory, Washington DC, USA (第19章)
- **Arman Ahnood**, Cambridge University, Cambridge, United Kingdom (第17章)
- **Timothy J. Anderson**, University of Florida, Gainesville, FL, USA (第16章)
- **Carter M. Armstrong**, L-3 Communications Electron Devices Inc., San Carlos, CA, USA (第19章)
- **Kaustav Banerjee**, University of California, Santa Barbara, CA, USA (第11章)
- **Supyrio Bandyopadhyay**, Virginia Commonwealth University, Richmond, VA, USA (第5章)
- **Gennadi Bersuker**, Sematech, Austin, TX, USA (第9章)
- **Richard C. Blish**, RBlish-CS, Saratoga, CA, USA (第9章)
- **Fabrizio Bonani**, Politecnico di Torino, Torino, Italy (第14章)
- **Joachim N. Burghartz**, Institute for Microelectronics Stuttgart (IMS CHIPS), Stuttgart, Germany (编辑; 第4章)
- **Marc Cahay**, University of Cincinnati, Cincinnati, OH, USA (第5章)
- **Kristy A. Campbell**, Boise State University, Boise, ID, USA (第13章)
- **Luigi Colombo**, Texas Instruments, Dallas, TX, USA (第10章)
- **John D. Cressler**, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA (第1章)
- **Mohamed N. Darwish**, Maxpower Semiconductor Inc., Campbell, CA, USA (第15章)
- **Alain Diebold**, College of Nanoscale Science and Engineering, University at Albany, Albany, NY, USA (第10章)
- **Robert Doering**, Texas Instruments, Dallas, TX, USA (第10章)
- **David Esseni**, University of Udine, Udine, Italy (第8章)
- **Giovanni Ghione**, Politecnico di Torino, Torino, Italy (第14章)
- **Avik Ghosh**, University of Virginia, Richmond, VA, USA (第5章)
- **Thomas Grant**, Communication & Power Industries LLC, Palo Alto, CA, USA (第19章)
- **Martin A. Green**, University of New South Wales, Sydney, Australia (第16章)
- **Xiaojun Guo**, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China (第17章)
- **Wilfried Haensch**, IBM Co. Yorktown Heights, NY, USA (第21章)

1952年到1976年、1976年之后，这和电子器件的早期发展、IRE、EDS的发展历程基本吻合。

当然，还有很多幕后英雄推动了这本书的诞生。在“鸣谢”部分，一并向他们表示感谢。

Joachim N. Burghartz

- **James S. Harris**, Stanford University, Stanford, CA, USA (第6章)
- **James A. Hutchby**, Semiconductor Research Corporation, Research Triangle Park, NC, USA (第12章)
- **Shuji Ikeda**, Tei Solutions Inc., Onogawa Tsukuba Ibaraki, Japan (第11章)
- **Hiroshi Iwai**, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan (第2章)
- **Chennupati Jagadish**, Australian National University, Canberra, Australia (第20章)
- **Dong Jin Jung**, Samsung Electronics Co. Ltd, Gyunggi-Do, South Korea (第3章)
- **Christoph Jungemann**, RWTH Aachen, Aachen, Germany (第8章)
- **Erich Kasper**, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany (第14章)
- **Lu Kasprzak**, Siemens Healthcare Diagnostics Inc., Newark, DE, USA (第9章)
- **Hanseup Kim**, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA (第18章)
- **Kinam Kim**, Samsung Electronics Co. Ltd, Gyunggi-Do, South Korea (第3章)
- **Jackson Lai**, Research in Motion Inc., Waterloo, Ontario, Canada (第17章)
- **Theodore J. Letavic**, IBM Co., Hopewell Junction, NY, USA (第15章)
- **Baruch Levush**, Naval Research Laboratory, Washington DC, USA (第19章)
- **Jürgen Lorenz**, Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology, Erlangen, Germany (第8章)
- **Leda Lunardi**, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA (第20章)
- **Colin C. McAndrew**, Freescale Semiconductor Inc., Tempe, AZ, USA (第4章和第7章)
- **William L. Menninger**, L-3 Communications Electron Technologies Inc., Torrance, CA, USA (第19章)
- **Sudha Mokkalapati**, Australian National University, Canberra, Australia (第20章)
- **Chandra Mouli**, Micron Technology, Boise, ID, USA (第13章)
- **Laurence W. Nagel**, Omega Enterprises Consulting, Kensington, CA, USA (第7章)
- **Arokia Nathan**, Cambridge University, Cambridge, United Kingdom (第17章)
- **Anthony S. Oates**, TSMC Co. Ltd, Hsinchu, Taiwan, China (第9章)
- **Mikael Östling**, KTH, Stockholm, Sweden (第15章)
- **Pierpaolo Palestri**, University of Udine, Udine, Italy (第8章)
- **Stephen Parke**, Northwest Nazarene University, Nampa, ID, USA (第13章)
- **Ruediger Quay**, Fraunhofer Institute of Applied Solid-State Physics, Freiburg, Germany (第14章)
- **Ken Rim**, IBM Corporation, Hopewell Junction, NY, USA (第6章)
- **Steven A. Ringel**, Ohio State University, Columbus, OH, USA (第16章)

- **Enrico Sangiorgi**, University of Bologna, Cesena, Italy (第8章)
- **Klaus Schuegraf**, Applied Materials, San Jose, CA, USA (第10章)
- **Luca Selmi**, University of Udine, Udine, Italy (第8章)
- **Rajendra Singh**, Clemson University, Clemson, SC, USA (第10章和第16章)
- **George E. Smith**, Nobel Laureate and EDS Celebrated Member, USA (前言)
- **James C. Sturm**, Princeton University, Princeton, NJ, USA (第6章)
- **Simon Min Sze**, Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, China (第2章)
- **Yuan Taur**, University of California at San Diego, San Diego, CA, USA (第2章)
- **Robert J. Walters**, Naval Research Laboratory, Washington DC, USA (第16章)
- **Katsuyoshi Washio**, Tohoku University, Sendai, Japan (第1章)
- **Richard K. Williams**, Advanced Analogic Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA

(第15章)

- **Hei Wong**, City University of Hong Kong, Hong Kong, China (第2章)
- **Chung-Chih Wu**, Taiwan University, Taipei, Taiwan, China (第6章)
- **Darrin J. Young**, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA (第18章)
- **Paul Yu**, University of California at San Diego, San Diego, CA, USA, and EDS President

2012–2013 (前言)

- **Bin Zhao**, Fairchild Semiconductor, Irvine, CA, USA (第12章)

致谢

本书编辑衷心感谢EDS执行委员会（EDS Executive Committee, ExCom）和EDS管理层（以前的EDS咨询委员会，Advisory Committee, Adcom），正是由于他们的财政支持，使得本书能顺利出版。Christopher Jannuzzi（EDS执行总监）亲自给我们支持和帮助，尤其是在New Jersey的New Brunswick的IEEE History Center，提供了许多历史轨迹中使用的图片。

诺贝尔奖获得者George E. Smith. 为本书写了前言，作为受益于各位贡献者的本书编辑，深感荣幸。他的善言帮助我们完成了这个雄心勃勃的书本编辑项目。

来自Stuttgart的IMS CHIPS的Joachim Deh帮助我们编辑了一些历史轨迹和第4章的图片，并对这些图片的版权做了合适的安排。Fernando Guarin（EDS秘书）在出版商编辑之前做了部分关键书评。感谢John Wiley & Sons的Peter Mitchell、Laura Bell、Liz Wingett、Richard Davies和Genna Manaog以及来自Laserwords Pvt Ltd.的Sangeetha Parthasarathy在快速编辑和出版过程中提供的帮助，特别感谢Peter Mitchell在和出版商谈判中体现出的耐心。此外，还感谢Bin Zhao（EDS副主席，会议）、Xing Zhou（EDS副主席，区域和章节）、Jean Bae（EDS执行官员）和Chris Jannuzzi以及所有对本书有贡献的个人或组织。

第6章的作者非常感谢中国台湾大学的Yi-Hsiang Huang和Princeton的Noah Jafferis，他们是提供图像处理帮助的专家。

第7章的作者感谢Gennady Gildenblat。他是Arizona State University的教授，提供了许多帮助，但并不是该章的共同作者。他在紧凑模型中的地位，在历史轨迹电影中也有反映。第8章的作者感谢University of Bologna的Claudio Fiegna，参与了很多建设性的讨论。

第15章的作者感谢Urbana-Champaign的University of Illinois的ECE Department的Dr. Phil Krein和Professor Emeritus Nick Holonyak在识别功率半导体的早期发展记录和编年史中提供的帮助。

第16章的作者特别感谢The Ohio State University的Dr. Tyler Grassman在该章技术内容和信息集成上提供的关键帮助。

第19章的作者感谢如下专家的无私帮助：Heinz Bohlen（Communications and Power Industries, USA, retired），Ernst Bosch（Thales Electron Devices GmbH, Germany），Gregory Nusinovich（Institute for Research in Electronics and Applied Physics, University of Maryland, College Park, USA），and Edward Wright（Beam-Wave Research Inc., USA）

介绍：历史轨迹

电子器件迄今已有40年的历史：最早是真空管，然后是晶体管，最后是集成电路。本书还介绍了电子器件的应用。追溯过去，有利于提高未来的研究效率。过去的先驱者将成为后来的电子器件工程师的榜样。

本书页底的历史轨迹电影有1 000多张幻灯片，按时间顺序展现了电子器件发展和应用的各个突破和里程碑。因此，有两种办法阅读这本书：逐章阅读，或按电子器件发展的历史轨迹阅读。



目录

前言 -1	iii
前言 -2	iv
序	v
对本书有贡献的人	viii
致谢	xi
介绍 : 历史轨迹	xiii
第一部分 基本电子设备	1
第 1 章 双极晶体管	3
1.1 动机	3
1.2 PN 结及其电子应用	5
1.3 双极结晶体管及其电子应用	9
1.4 双极二极管的优化	14
1.5 硅锗异质双极晶体管 (SiGe HBT)	15
参考文献	18
第 2 章 MOSFETs	19
2.1 MOSFET 介绍	19
2.2 MOSFET 基础	19
2.3 MOSFET 演化	24
2.4 结束语	27
参考文献	28
第 3 章 存储设备	39
3.1 介绍	39
3.2 易失性存储器	40
3.3 非易失性存储器	42
3.4 MOS 存储展望	44

3.5 结束语	45
参考文献	46
第 4 章 无源器件	49
4.1 离散和集成的无源器件	49
4.2 模拟 IC 和 DRAM	51
4.3 案例研究——平面螺旋电感	53
4.4 集成电路中的寄生效应	55
参考文献	55
第 5 章 新兴设备	59
5.1 不可充电开关	59
5.2 硅的替代物碳和石墨烯电子学与分子电子学的兴起	62
5.3 结束语	65
参考资料	65
第二部分 电子设备和 IC 制造	69
第 6 章 电子材料	71
6.1 介绍	71
6.2 硅设备技术	71
6.3 化合物半导体设备	74
6.4 电子显示	77
6.5 结束语	80
参考文献	81
第 7 章 紧凑建模	83
7.1 紧凑模型的角色	83
7.2 双极晶体管紧凑建模	84
7.3 MOS 晶体管紧凑建模	86
7.4 无源器件的紧凑建模	88
7.5 基准测试和模型应用	90
参考文献	90
第 8 章 计算机辅助设计 (CAD) 技术	93
8.1 介绍	93
8.2 飘移扩散模型	94
8.3 微观传输模型	95
8.4 量子传输模型	96