



半导体科学与技术丛书



半导体科学与技术

何 杰 夏建白 主编

 科学出版社
www.sciencep.com

TN3/14

2007



华夏英才基金学术文库

半导体科学与技术丛书

半导体科学与技术

何 杰 夏建白 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在国家自然科学基金委员会信息科学部的支持下,邀请了三十余位工作在半导体研究领域第一线的知名专家撰写而成的。本书系统介绍了当前国际、国内半导体科学和技术各个领域,包括半导体材料的生长、物理问题、重要实验和理论结果、器件结构和应用等方面的基础知识、研究现状、发展趋势和有待解决的关键问题。

本书适合从事半导体研究和教学的大学教师、科技工作者、工程技术人员、研究生、本科生以及科技管理部门有关工作人员和管理专家阅读和参考。

图书在版编目(CIP) 数据

半导体科学与技术/何杰,夏建白主编. —北京:科学出版社,2007

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-019742-9

I. 半… II. ①何…②夏… III. 半导体技术 IV. TN3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 130395 号

责任编辑:田士勇 吴凡洁 牛宇锋 吴伶伶/责任校对:包志虹

责任印制:刘士平/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年9月第一次印刷 印张:44 1/2

印数:1—3 000 字数:860 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

“半导体科学与技术丛书”编委会

名誉顾问	王守武	汤定元	王守觉			
顾 问	(按姓氏汉语拼音字母排序)					
	陈良惠	陈星弼	雷啸霖	李志坚	梁骏吾	沈学础
	王 圩	王启明	王阳元	王占国	吴德馨	郑厚植
	郑有炘					
主 编	夏建白					
副 主 编	陈弘达	褚君浩	罗 毅	张 兴		
编 委	(按姓氏汉语拼音字母排序)					
	陈弘毅	陈诺夫	陈治明	杜国同	方祖捷	封松林
	黄庆安	黄永箴	江风益	李国华	李晋闽	李树深
	刘忠立	鲁华祥	马骁宇	钱 鹤	任晓敏	邵志标
	申德振	沈光地	石 寅	王国宏	王建农	吴晓光
	杨 辉	杨富华	余金中	俞育德	曾一平	张 荣
	张国义	赵元富	祝宁华			
执行编辑	田士勇					

《半导体科学与技术》作者名单

- 绪论 夏建白（中国科学院半导体研究所）
- 第1章 杨德仁（浙江大学）
- 第2章 郑有炘（南京大学）
- 第3章 郝跃（西安电子科技大学）
- 第4章 李爱珍（中国科学院上海微系统与信息技术研究所）
- 第5章 叶小玲、王占国（中国科学院半导体研究所）
- 第6章 王志功、李智群、冯军（东南大学）
- 第7章 张波、李肇基（电子科技大学）
- 第8章 廖显伯、向贤碧（中国科学院半导体研究所）
- 第9章 刘明、陈宝钦（中国科学院微电子研究所）
- 第10章 陈弘达（中国科学院半导体研究所）
- 第11章 许振嘉（中国科学院半导体研究所）
- 第12章 祝宁华（中国科学院半导体研究所）
- 第13章 黄如（北京大学）
- 第14章 熊绍珍（南开大学）
- 第15章 施毅（南京大学）
- 第16章 夏建白（中国科学院半导体研究所）
- 第17章 李树深、郑厚植（中国科学院半导体研究所）
- 第18章 张荣、修向前（南京大学）
- 第19章 王跃林、李铁、李昕欣（中国科学院微系统与信息技术研究所）
- 第20章 王立军、宁永强（中国科学院长春光学精密机械与物理研究所）

“半导体科学与技术丛书”出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动 21 世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套“半导体科学与技术丛书”的目的是为了总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为半导体科学技术的强国。

出版“半导体科学与技术丛书”是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入、献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

“半导体科学与技术丛书”将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累

累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

中国科学院院士

夏建白

2005 年 3 月 16 日

前 言

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键性的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展，并在许多技术领域内引起革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术，而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动 21 世纪的技术发展和产业革命。半导体科学与技术已成为与国民经济发展、社会进步及国家安全密切相关的、重要的科学技术。

胡锦涛主席强调我国科学技术要走自主创新的道路。温家宝总理在 2005 年 3 月 28 日国家科学技术奖励大会上的讲话更是阐明了这一观点：“当今世界，科学技术是综合国力竞争的决定性因素，自主创新是支撑一个国家崛起的筋骨。我们要引进和学习世界上先进的科技成果，但更重要的是要立足自主创新，真正的核心技术是买不来的。只有拥有强大的科技创新能力，拥有自主知识产权，才能提高我国的国际竞争力，才能享有受人尊重的国际地位和尊严。”

为发展我国的半导体事业，加快提高我国科技自主创新能力，推动我国国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展，满足国民经济和国防建设的重大需求，在国家自然科学基金委员会信息科学部的支持下，我们邀请了工作在第一线的有关专家撰写了这本关于半导体科学与技术的书。

半导体科学技术对人类的文明史做出了重要的贡献，在未来将发挥更重要的作用。以晶体管、集成电路和半导体激光器为代表的半导体科学技术在 20 世纪引发了信息、通信、计算等领域的革命，产生了巨大的经济和社会效益。本书既是对过去几十年半导体科学技术发展的一个小结，也是对未来几十年半导体科学技术发展的一个展望。半导体是一个国家科学技术的“基石”，希望本书的出版能够引起国家科技管理部门领导对半导体技术的重视，并能在总体规划上有所部署。

半导体科学技术与人们的日常生活息息相关，每当半导体科学技术有所突破，它将立即被产业化，在产生巨大经济效益的同时，大大提高了人们的生活质量。这几年，计算机、移动电话、电视等的发展就是最好的证明。通过本书，读者将了解这些我们日常生活中用到的东西是如何与“半导体”相联系的，半导体器件正是这些产品的“心脏”，缺了它就不能工作。希望本书的出版能够引起广大青年读者，特别是大、中学生对半导体科学技术的兴趣，使其投身到半导体事业中来。

半导体科学技术是一门综合性学科，它涉及基础科学，包括物理（量子力学、固体物理、光学）、化学，甚至生物；技术科学，包括电子学、材料学、精密光机电、独特的半导体工艺等；以及产业化。作为个人来说，在半导体的某一个具体领域内工作也需要了解其他领域的工作。作为整体来说，在目前科研投入比较困难的条件下，更需要各部门、各单位之间的团结协作。希望本书的出版能够使读者了解我国半导体各研究领域的概貌，促进各单位之间的合作与交流。同时，也为刚从事半导体领域科研和教学工作的青年学者提供一本入门参考书，让他们通过阅读本书的有关章节和参考文献，可以很快地进入这一领域。

全书共 20 章，按内容大致可以分为：①半导体材料和器件（第 1~8 章）；②半导体工艺和测试技术（第 9~12 章）；③半导体科学和技术的发展（第 13~18 章）；④半导体技术的应用（第 19~20 章）。这种分法只是大致的，因为各章节都是互相包含、交叉的。

本书的作者都是长年工作在第一线的专家、学者，本书的内容都是他们长期工作的积累。他们在繁忙的研究或教学工作之余，认真精心地为本书撰稿。他们介绍的内容具有很高的权威性，列出的详尽文献为读者进一步深入研究提供了参考。在此，编者向他们表示衷心的感谢。

本书的出版得到华夏英才出版基金的资助和国家自然科学基金委员会信息学部的支持，特此致谢。

何 杰 夏建白

2006 年 12 月 25 日

目 录

“半导体科学与技术丛书”出版说明

前言

绪论	1
0.1 半导体发展历史上的几个里程碑	1
0.2 半导体技术的应用	1
0.3 我国的半导体产业发展现状	3
0.4 半导体科学技术的未来发展	3
参考文献	6
第1章 半导体硅材料	7
1.1 硅材料的历史和发展	8
1.2 集成电路用硅材料	11
1.2.1 集成电路用直拉硅单晶	11
1.2.2 大直径硅单晶的晶体生长	12
1.2.3 大直径硅单晶的缺陷工程	15
1.2.4 大直径硅单晶的外延	20
1.2.5 SOI 和应变硅材料	21
1.3 太阳能电池用硅材料	21
1.3.1 太阳能电池用硅材料的研究	21
1.3.2 太阳能级多晶硅	24
1.3.3 太阳能电池用铸造多晶硅	25
1.3.4 太阳能电池用非晶硅薄膜	27
1.3.5 太阳能电池用多晶硅薄膜	30
1.3.6 太阳能电池用带硅材料	33
1.4 光电子用硅材料	35
1.4.1 硅晶体位错发光	35
1.4.2 多孔硅发光	37
1.4.3 硅基纳米硅发光	39
1.4.4 纳米硅丝/硅管	41
参考文献	43
第2章 宽禁带半导体光电子器件	45
2.1 发光二极管	46

2.1.1	Ⅲ族氮化物 LED	46
2.1.2	ZnO 基 LED	51
2.2	激光二极管	53
2.2.1	法布里-珀罗 (F-P) 型激光器	53
2.2.2	分布反馈Ⅲ族氮化物半导体激光器	57
2.2.3	垂直腔面发射Ⅲ族氮化物半导体激光器	58
2.3	半导体白光照明	59
2.3.1	发展半导体白光照明的意义	59
2.3.2	Ⅲ族氮化物 LED 白光照明技术途径	60
2.3.3	LED 白光照明技术发展动向	64
2.3.4	Ⅲ族氮化物白光照明材料发展概况	65
2.4	固态紫光光源	66
2.4.1	紫光 LED 研究进展	67
2.4.2	紫光 LED 材料面临的几个科学技术问题	68
	参考文献	71
第 3 章	宽禁带半导体电子器件	74
3.1	导言	74
3.2	GaN 材料的研究进展	75
3.2.1	GaN 材料的制备	75
3.2.2	GaN 材料的缺陷	77
3.2.3	Ⅲ族氮化物的极化效应	78
3.2.4	GaN 基异质结	80
3.3	GaN 基 HEMT 器件	81
3.3.1	GaN 基 HEMT 器件的目标特性	81
3.3.2	GaN 基 HEMT 的电流崩塌现象	83
3.3.3	热处理	84
3.3.4	槽栅、表面处理和场板	85
3.3.5	纵向层式结构设计	87
3.3.6	蓝宝石或 SiC 衬底上 GaN 基 HEMT 的最高性能水平	89
3.3.7	Si 衬底上的 GaN 基 HEMT	94
3.3.8	增强型 HEMT	95
3.4	其他 GaN 基电子器件	97
3.4.1	GaN 基 MISHFET	97
3.4.2	GaN 基 HBT	99
3.5	SiC 材料与电子器件	100

3.5.1 SiC 材料的制备	100
3.5.2 SiC 材料的缺陷	101
3.5.3 SiC 基器件工艺	102
3.5.4 SiC 基二极管和整流器	103
3.5.5 SiC 基金属-氧化物-半导体场效应管	105
3.5.6 SiC 基结型场效应管 (JFET) 和肖特基栅场效应管 (MESFET)	107
3.5.7 SiC 基双极结型晶体管 (BJT) 和绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	109
参考文献	110
第 4 章 红外半导体材料和器件	116
4.1 红外半导体激光材料和激光器的进展简介	116
4.2 近红外边发射半导体激光材料和器件	117
4.2.1 808 nm 短波长 AlGaAs/GaAs 异质结激光器材料和器件	118
4.2.2 1.3~1.55 μm 长波长 InP 基激光器材料和器件	118
4.2.3 980nm InGaAs/GaAs 应变量子阱激光器材料	119
4.3 近红外垂直面发射半导体激光器材料和器件	120
4.3.1 近红外垂直面发射半导体激光器结构和材料	121
4.3.2 近红外垂直腔面发射激光器材料和器件	123
4.4 中红外带间跃迁半导体异质结量子阱激光材料和器件	126
4.4.1 2.0 μm InP 基 InGaAs/InGaAsP 应变补偿量子阱激光器材料和器件	126
4.4.2 IV-VI 族铅盐化合物中远红外量子阱激光器材料和器件	127
4.4.3 2~5 μm GaSb 基碲化物量子阱激光器材料和器件	129
4.5 GaSb 基带间级联激光器材料和器件	131
4.6 中远红外 InP 基量子级联激光器材料和器件	133
4.6.1 带内子带间光跃迁激射理论	134
4.6.2 InP 基室温连续和室温大功率多模量子级联激光器	136
4.6.3 InP 基中红外短波端 ($\lambda \approx 3 \sim 6 \mu\text{m}$) 多模应变补偿量子级联激光器	137
4.6.4 中红外 InP 基单模量子级联分布反馈激光器	140
4.6.5 InP 基中红外长波端和远红外波段量子级联激光器	142
4.7 中、远红外 GaAs 基量子级联激光器材料和器件	143
4.7.1 GaAs 基中红外量子级联激光器	143
4.7.2 GaAs 基远红外量子级联激光器	144
4.8 小结和展望	147
参考文献	149
第 5 章 低维半导体材料和器件	158
5.1 引言	158

5.2	低维半导体材料的发展概况	158
5.3	低维半导体材料的制备技术	162
5.4	半导体激光器和发光管	165
5.4.1	边发射激光器	166
5.4.2	量子阱激光器	167
5.4.3	量子点、量子线激光器	168
5.4.4	垂直腔面发射激光器	172
5.4.5	量子级联激光器	175
5.4.6	微腔激光器	178
5.4.7	超辐射发光管	181
5.5	半导体红外光探测器	183
5.6	超高频微电子器件	185
5.6.1	高电子迁移率晶体管 HEMT	186
5.6.2	异质结双极晶体管 HBT	188
5.6.3	共振隧穿器件	192
5.6.4	三端弹道运输器件	193
5.7	单电子器件	194
5.7.1	单电子晶体管	195
5.7.2	单电子存储器	197
5.8	存在的问题及发展趋势	198
	参考文献	201
第 6 章	射频系统与射频集成电路设计	204
6.1	导言	204
6.2	射频定义	204
6.3	射频通信系统	205
6.3.1	数字无线电广播	205
6.3.2	数字电视	207
6.3.3	射频识别 RFID	208
6.3.4	卫星定位系统	209
6.3.5	移动通信系统	210
6.3.6	无线局域网与无线城域网	211
6.3.7	微波通信与卫星通信	212
6.3.8	雷达系统	213
6.4	射频系统组成	215
6.4.1	射频发射机组成	215

6.4.2 直接解调式接收机结构	216
6.4.3 超外差结构	216
6.5 射频集成电路设计专用知识	217
6.5.1 传输线效应	218
6.5.2 史密斯圆图及其应用	219
6.5.3 S 参数	221
6.6 射频 IC 工艺	221
6.6.1 单质与异质双极结型晶体管工艺	221
6.6.2 射频 CMOS 工艺	222
6.6.3 GaAs MESFET 与 HEMT 工艺	223
6.7 射频 IC 设计工程	225
6.8 主要射频 IC 设计	227
6.9 小结	236
参考文献	237
第 7 章 功率半导体器件与功率集成电路	238
7.1 功率半导体器件的定义与发展简史	238
7.2 功率二极管和功率开关器件	239
7.2.1 功率二极管	239
7.2.2 功率双极型开关器件	241
7.2.3 功率 MOS 器件	243
7.2.4 Super Junction 结构	244
7.2.5 IGBT 和 MCT	250
7.2.6 SiC 功率开/关器件	251
7.3 功率集成电路与集成功率模块	252
7.3.1 功率集成电路	252
7.3.2 RESURF 理论	254
7.3.3 SOI 高压集成技术	255
7.3.4 BCD 工艺技术及功率封装技术	257
7.3.5 智能功率模块	260
参考文献	260
第 8 章 太阳电池	267
8.1 导言	267
8.2 太阳电池工作原理和效率	268
8.3 晶体硅太阳电池	268
8.4 III-V 族化合物太阳电池	271

8.4.1	Ⅲ-V族化合物太阳能电池的特点和发展历史	271
8.4.2	单结 GaAs 太阳电池	273
8.4.3	单结 GaAs/Ge 异质结太阳电池	274
8.4.4	多结叠层Ⅲ-V族太阳电池	275
8.4.5	GaAs 聚光太阳电池	278
8.4.6	超薄型Ⅲ-V族太阳电池	278
8.4.7	Ⅲ-V族量子阱太阳电池	280
8.5	硅基薄膜太阳电池	282
8.5.1	非晶硅基薄膜的制备和基本性质	282
8.5.2	非晶硅的光致变化及其抑制途径	284
8.5.3	微晶硅和纳米硅薄膜	285
8.5.4	非晶硅单结太阳电池	285
8.5.5	非晶硅/非晶硅叠层太阳电池	286
8.5.6	非晶硅/微晶硅叠层太阳电池	287
8.5.7	多晶硅薄膜太阳电池	289
8.6	其他薄膜太阳电池简介	291
8.6.1	铜铟镓硒(CIGS)太阳电池	291
8.6.2	碲化镉薄膜太阳电池	294
8.6.3	染料敏化太阳电池	296
8.7	第三代太阳电池	299
8.8	展望	302
	参考文献	303
第9章	微光刻与微纳米加工技术	306
9.1	微光刻与微/纳米加工技术简介	306
9.1.1	微电子技术的关键工艺技术	306
9.1.2	微光刻与微/纳米加工技术面临的挑战与需要解决的关键技术问题 ..	307
9.2	微光刻图形设计与数据处理技术的研究	311
9.2.1	计算机辅助设计技术	311
9.2.2	微光刻图形设计及数据格式转换体系的研究	312
9.3	光学光刻分辨率增强技术的研究	317
9.3.1	移相掩模制造技术及应用技术研究	318
9.3.2	光学邻近效应校正掩模制造技术及应用技术研究	320
9.3.3	可制造性设计技术研究	321
9.4	电子束曝光技术的研究	323
9.4.1	电子束曝光模拟与电子束邻近效应校正技术研究	326

9.4.2 光学光刻系统和电子束光刻系统之间的匹配与混合光刻技术的研究	328
9.5 刻蚀技术研究	328
9.5.1 湿法腐蚀技术	329
9.5.2 干法刻蚀技术	330
9.5.3 反应离子刻蚀技术	332
9.5.4 感应耦合等离子刻蚀技术	332
9.6 下一代光刻技术与掩模制造技术的研究	333
9.6.1 X射线光刻技术及掩模制造技术	333
9.6.2 极紫外投影光刻技术及掩模制造技术	335
9.6.3 散射角限制的投影电子束曝光技术及掩模制造技术	337
9.6.4 可变轴浸没透镜电子束投影微缩曝光技术	338
9.6.5 聚焦离子束加工技术	338
9.7 纳米器件和纳米结构图形加工技术的研究	341
9.7.1 亚 50nm CMOS 器件研究	341
9.7.2 纳米压印光刻技术研究	343
9.8 小结	346
参考文献	347
第 10 章 微电子与光电子集成	351
10.1 光发射器件技术	352
10.1.1 硅基光发射二极管	352
10.1.2 硅基半导体激光器	357
10.2 光电探测器技术	358
10.2.1 半导体光电探测器的基本结构	358
10.2.2 基于硅基双极型工艺的光电探测器	360
10.2.3 基于硅基 CMOS 工艺的集成光电探测器	363
10.3 光波导集成技术	370
10.3.1 半导体光波导基本结构	370
10.3.2 半导体光波导的应用	374
10.4 硅基光电子集成电路	378
10.4.1 硅基光电子集成电路简介	379
10.4.2 集成硅基光发射器	380
10.4.3 集成硅基光波导	382
10.4.4 集成硅基光电接收机	385
10.5 小结	388
参考文献	388

第 11 章 半导体的检测与分析	391
11.1 科学内容	392
11.1.1 体单晶	392
11.1.2 薄膜	397
11.1.3 器件工艺	402
11.1.4 超晶格、量子阱、量子线、量子点、纳米材料	404
11.2 实验技术	406
11.2.1 电学表征	407
11.2.2 光学表征	409
11.2.3 X 射线衍射表征	413
11.2.4 离子束技术	415
11.2.5 电子束显微学	416
11.2.6 俄歇电子谱、X 射线光电子谱	417
11.2.7 扫描探针显微学 (SPM)	418
11.2.8 其他表征实验技术	418
11.3 展望与建议	419
11.3.1 展望	419
11.3.2 建议	420
参考文献	420
第 12 章 高速光电子器件测试与封装	422
12.1 高速半导体光电子器件的封装设计	422
12.1.1 半导体光电子器件的封装形式	422
12.1.2 高速光电子器件的微波封装设计	424
12.1.3 高速半导体光电子器件封装设计的发展方向	425
12.2 小信号频率响应测试方法	426
12.2.1 微波矢量网络分析仪扫频测试法	426
12.2.2 光外差测试法	428
12.2.3 小信号功率测试法	430
12.2.4 小信号频率响应测试的发展趋势	432
12.3 高速光电子器件的大信号响应测试	433
12.3.1 眼图测试分析	433
12.3.2 误码率测试分析	435
12.3.3 低误码率的测算	436
12.3.4 大信号响应测试的发展趋势	437
12.4 高速光电子器件的等效电路模型	438