

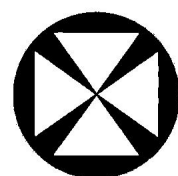
XINXI
GONGNENG
CAILIAO
SHOUCE

信息功能 材料手册王

王占国 陈立泉 屠海令 主编



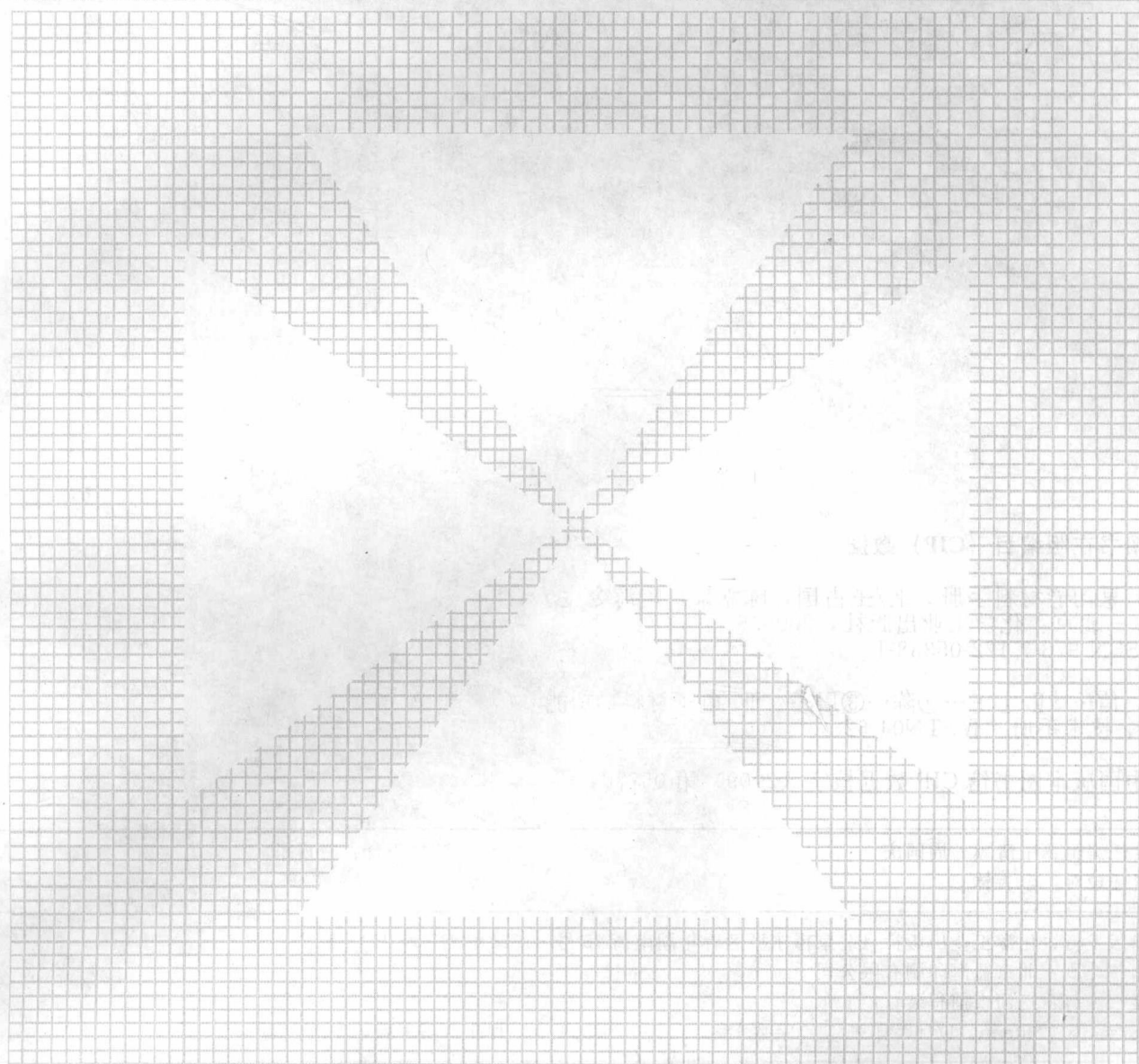
化学工业出版社



信息功能材料手册

【上】

王占国 陈立泉 屠海令 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

《信息功能材料手册》涉及信息的获取、传输、存储、显示和处理等主要技术用的材料与器件，对各种材料的结构、性能、制备工艺以及电子器件的制造和应用都进行了详细的介绍。本书不仅全面系统地反映了国外信息功能材料研究领域的现状、最新进展和发展趋势，而且也特别注重我国在该领域的研发和产业化方面取得的成果，力图使其具有实用性、先进性和权威性。本书的出版，将有力推动我国信息技术和信息产业的健康发展。

本书主要供从事信息功能材料的科研工作者和工程技术人员查阅使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

信息功能材料手册. 上/王占国, 陈立泉, 屠海令主编.
—北京: 化学工业出版社, 2009.6
ISBN 978-7-122-05338-1

I. 信… II. ①王…②陈…③屠… III. 电子材料: 功能材料-技术手册 IV. TN04-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 057704 号

责任编辑: 王清颢 周国庆
责任校对: 李 林

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京蓝海印刷有限公司

装 订: 三河市前程装订厂

880mm×1230mm 1/16 印张 42 字数 1883 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 130.00 元

版权所有 违者必究

前言

信息功能材料是信息科学技术和信息产业发展的基础和先导。21 世纪将是信息产业为核心的知识经济时代,对信息技术和信息资源的竞争将更加激烈。我国电子信息行业 2004 年完成产品销售收入达 26500 亿元,多年来已居外贸出口首位,并继续以高出工业发展速度 10% 的速度发展,已成为世界信息产业大国。加快由信息产业大国向信息产业强国迈进的步伐,是我们广大从事信息技术,特别是信息功能材料工作者义不容辞的责任。希望本书的出版,将有力推动我国信息技术和信息产业的健康发展。

本手册分上、中、下三册出版,共设 20 篇,约 600 万字。它涉及信息的获取、传输、存储、显示和处理等主要技术用的材料与器件,是目前我国该领域比较完整的专业工具书。参加这部书编写的有中科院、高校和部分企业的专家教授近 200 名。参加编写的主要单位有中科院半导体研究所、中科院物理研究所、中科院微电子研究所、中科院上海精密光学机械研究所、中科院上海红外技术物理研究所、中科院长春应用化学研究所、中科院合肥固体物理所、南京大学、清华大学、西安理工大学、北京有色金属研究总院、武汉邮电科学研究院等。历时近 3 年完稿。由王占国、陈立泉、屠海令任主编并统稿。各篇主编如下。

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 第 1 篇 概论 | 王占国院士 |
| 第 2 篇 半导体硅材料 | 杨德仁教授 |
| 第 3 篇 集成电路制造技术 | 吴德馨院士 刘明研究员 |
| 第 4 篇 硅基异质结构材料和器件 | 余金中研究员 |
| 第 5 篇 化合物半导体材料 | 屠海令教授 赵有文研究员 |
| 第 6 篇 宽带隙半导体及其应用 | 郑有炘院士 |
| 第 7 篇 半导体低维结构和量子器件 | 陈涌海研究员 叶小玲教授 王占国院士 |
| 第 8 篇 存储材料 | 顾冬红研究员 吴谊群研究员 |
| 第 9 篇 显示材料 | 邱勇教授 应根裕教授 |
| 第 10 篇 通信光纤材料及其工艺 | 赵梓森院士 |
| 第 11 篇 全固态激光器及相关材料 | 许祖彦院士 沈德忠院士 |
| 第 12 篇 稀土磁性材料与自旋电子材料 | 刘治国教授 |
| 第 13 篇 超导材料 | 陈立泉院士 靳常青教授 |
| 第 14 篇 传感器材料 | 陈治明教授 雷天民教授 |
| 第 15 篇 红外材料 | 储君浩教授 |
| 第 16 篇 先进储能材料 | 陈立泉院士 |
| 第 17 篇 一维纳米材料和纳米结构 | 张立德教授 解思深院士 |
| 第 18 篇 发光材料 | 石春山研究员 |
| 第 19 篇 微加工技术 | 冯稷教授 |
| 第 20 篇 光子晶体 | 张道中教授 |

本书各篇不仅全面系统地反映了国外信息功能材料研究领域的现状、最新进展和发展趋势,而且也特别注重我国在该领域的研发和产业化方面取得的成果,力图使其具有实用性、先进性和权威性。本书适合从事信息功能材料的科研工作者和工程技术人员查阅使用,也可供有关师生参考。

感谢有关单位和参编作者的大力支持和共同努力,由于编写时间和编者水平所限,书中的不当之处,恳请读者批评指正。

王占国 陈立泉 屠海令

编辑委员会^①

顾问：师昌绪 严东生 李恒德 何光远 陆燕荪 徐匡迪 李学勇 栾恩杰
王淀佐 朱道本 颜鸣皋 黄培云 周 廉 左铁镛
主任：路甬祥
副主任：李成功（常务） 钟群鹏 干 勇 黄伯云 江东亮 徐滨士 王占国
潘健生 杜善义 胡正寰 柳百成 徐祖耀 陈立泉
总策划：宋天虎 黄远东 总编辑：李骏带 秘书长：黄远东（兼）
委员（按姓氏笔画排列）：

丁 辛	丁传贤	干 勇	于月光	才鸿年	马世宁	马冲先	马济民	马眷荣
马福康	王占国	王务同	王尔德	王永岩	王亚军	王至尧	王克光	王克俭
王高潮	王淀佐	王琦安	王新林	王德志	方禹之	尹志民	邓 炬	左铁钊
左铁镛	石力开	石春山	卢世刚	叶小玲	叶光斗	田志凌	田荣璋	史耀武
冯 涤	冯 稷	冯春祥	宁远涛	邢建东	师昌绪	吕 炎	吕反修	同继锋
曲文生	朱万森	朱如瑾	朱绍华	朱道本	仲维卓	任家烈	华 林	刘 明
刘正才	刘世参	刘占阳	刘邦津	刘作信	刘其贤	刘郁丽	刘治国	刘建章
刘晋春	刘清友	刘献明	齐从谦	闫 洪	江东亮	许祖泽	许祖彦	阳明书
孙 坚	孙加林	杜善义	杨 合	杨 武	杨乃宾	杨才福	杨鸣波	杨忠民
杨晓华	杨海波	杨焕文	杨德仁	李 强	李 晋	李 楠	李长久	李龙土
李成功	李光福	李志刚	李明哲	李明辉	李学勇	李虹霞	李恒德	李贺军
李海军	李骏带	李鹤林	严东生	连克仁	肖亚庆	吴 行	吴 昆	吴 诚
吴永声	吴伟仁	吴性良	吴科如	吴恩熙	吴谊群	吴智华	吴德馨	何光远
何季麟	佟晓辉	邱 勇	邱冠周	邱德仁	余金中	邹广田	汪明朴	沈 真
沈万慈	沈德忠	宋天虎	张 力	张 扬	张 华	张 杰	张 金	张 峥
张子龙	张用宾	张立同	张永俐	张吉龙	张旭初	张佐光	张晋远	张康侯
张道中	张新民	陆燕荪	陈 琦	陈文哲	陈世朴	陈立泉	陈远远	陈志良
陈国钧	陈治明	陈南宁	陈祝年	陈晓慈	陈涌海	陈祥宝	陈超志	林慧国
欧阳世翥	卓尚军	易建宏	罗祥林	罗豪甦	果世驹	周廉	周伟斌	周国庆
郑有焯	柳玉起	柳百成	胡玉亭	胡正寰	南策文	赵万生	赵有文	赵国群
赵金榜	赵梓森	赵慕岳	钟群鹏	施东成	施剑林	姜不居	姜晓霞	祖荣祥
姚 燕	贺守华	耿 林	聂大钧	贾成厂	顾冬红	夏巨湛	夏志华	俸培宗
徐匡迪	徐廷献	徐建军	徐祖耀	徐家文	徐跃明	徐滨士	殷树言	翁宇庆
郭会光	郭景杰	高瑞萍	栾恩杰	唐仁政	唐汝钧	唐志玉	唐昌世	益小苏
涂善东	黄 勇	黄天佑	黄玉东	黄本立	黄远东	黄伯云	黄校先	黄培云
曹勇家	曹湘洪	龚七一	崔 健	康喜范	梁 齐	梁 军	梁志杰	屠海令
隋同波	韩凤麟	彭艳萍	葛子干	董 瀚	董汉山	董首山	董祖珏	董湘怀
蒋力培	蒋建平	傅绍云	储君浩	谢邦互	谢里阳	谢建新	鄢国强	雷天民
路甬祥	解应龙	解思深	雍歧龙	蔡中义	漆 玄	谭 抚	熊守美	靳常青
樊东黎	黎文献	颜永年	颜鸣皋	潘正安	潘叶金	潘振甦	潘健生	燕 瑛
戴国强								

① 本书是原《中国材料工程大典》其中的一卷。《中国材料工程大典》由中国机械工程学会、中国材料研究学会组织编写，中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会及中国复合材料学会参加组织编写。本编辑委员会即为《中国材料工程大典》编委会。

目 录

第1篇 概论	1	第2篇 半导体硅材料	29
第1章 信息功能材料在信息技术中的战略地位	3	第1章 概述	31
第2章 信息功能材料的发展现状和趋势	4	1 硅材料的研究和应用	31
1 半导体硅材料	4	1.1 硅材料的研究和开发	31
1.1 硅材料的发展现状	4	1.2 集成电路用硅单晶	32
1.2 发展趋势	4	1.3 太阳能电池用硅材料	32
1.3 我国硅材料的发展现状与趋势	5	1.4 光电子用硅材料	33
1.4 半导体集成电路的发展——从晶体管到集成电路简述	6	2 硅材料的晶体结构	34
1.5 微纳米加工技术简介	6	3 硅材料的基本性质	36
2 硅基异质结构材料	7	3.1 硅材料的基本物理性质	36
2.1 GeSi/Si 材料	7	3.2 硅材料的基本化学性质	36
2.2 硅基Ⅲ~Ⅴ族材料	8	3.3 硅材料的电学性质	37
2.3 硅基发光材料	8	第2章 硅单晶的制备	39
2.4 硅基激光器研究取得重要进展	8	1 高纯多晶硅的制备	39
2.5 硅基氮化镓发光材料和器件	8	1.1 冶金级硅的制备	39
3 GaAs 和 InP 基Ⅲ~Ⅴ族化合物半导体材料	8	1.2 SIMENS 方法 (SiHCl_3 法) 制造多晶硅	40
3.1 GaAs 和 InP 单晶材料	9	1.3 ASiMi 方法 (SiH_4 法) 制造多晶硅	40
3.2 GaAs 和 InP 基超晶格、量子阱材料与器件	9	1.4 粒状多晶硅的制造技术	41
3.3 一维量子线、零维量子点材料	13	2 单晶硅的生长	41
4 宽带隙半导体材料	15	2.1 硅单晶的区熔生长	41
4.1 GaN 基异质外延材料	15	2.2 硅单晶的直拉生长	42
4.2 碳化硅 (SiC) 和氧化锌 (ZnO) 材料	15	3 硅的外延生长	51
4.3 单晶金刚石薄膜研究进展	15	3.1 外延的化学反应	52
4.4 宽带隙半导体材料研究存在的问题	16	3.2 掺杂	53
5 光纤和光纤传感材料	16	3.3 外延工艺过程	53
5.1 通信光纤的发展历史和应用现状	16	3.4 自掺杂	54
5.2 光纤通信技术的发展趋势	16	3.5 缺陷的产生和消除	54
5.3 我国光纤产业的发展现状	17	3.6 图形漂移和变形	54
5.4 光纤传感技术的发展现状与趋势	18	3.7 外延沉积设备	55
6 信息存储材料和器件	18	3.8 低温硅外延	55
6.1 信息存储材料与器件的发展现状	18	4 绝缘体上的硅 (SOI)	57
6.2 信息存储材料的发展趋势	19	4.1 SIMOX 工艺	57
7 发光与显示材料与技术	20	4.2 智能剥离工艺 (Smart Cut™ process)	58
7.1 发光材料	20	4.3 智能剥离工艺的改良	59
7.2 显示材料与技术	20	4.4 应变 SOI 结构	59
8 信息获取相关材料与器件	21	第3章 硅晶体的力学性能	60
8.1 探测器材料与器件	21	1 单晶硅的力学及传热学常数	60
8.2 半导体传感器材料的发展现状与趋势	22	2 硅单晶的断裂	61
9 全固态激光材料和器件	23	2.1 硅单晶的晶向对断裂的影响	61
10 光子晶体和左手材料	23	2.2 样品形貌对断裂的影响	62
10.1 光子晶体的研究现状与发展趋势	23	2.3 杂质对硅单晶断裂的影响	62
10.2 左手材料的研究现状与发展趋势	24	3 硅单晶的塑性变形	63
11 超导电子学器件和量子信息材料	24	3.1 硅单晶的脆塑转变	63
11.1 超导材料与超导电子学器件的应用简介	24	3.2 硅单晶的塑性变形	63
11.2 固态量子比特构筑和量子信息	25	3.3 掺杂效应	65
12 我国信息功能材料的研究现状和发展趋势	26	4 器件工艺中的热应力及硅片翘曲	66
12.1 我国信息功能材料的研究现状	26	4.1 硅片热应力分布的影响因素	66
12.2 信息功能材料与技术的发展趋势	27	4.2 硅片热处理中的热应力分布	67
参考文献	28	第4章 硅晶体表面性质	69
		1 硅晶体的表面	69
		2 硅的表面态及表面原子结构	71
		2.1 硅的表面态	71
		2.2 硅的表面原子结构	71

3 硅/二氧化硅的界面性质	73	3 硅单晶中的氮杂质	111
4 硅的表面钝化	73	3.1 硅单晶中氮的基本性质	111
4.1 二氧化硅	74	3.2 硅单晶中氮对微缺陷的作用	112
4.2 氮化硅	74	3.3 硅单晶中氮对机械强度的作用	112
4.3 氧化铝	75	3.4 硅单晶中氮对氧沉淀、氧施主和 内吸杂的作用	113
4.4 非晶硅钝化工艺	75	3.5 硅单晶中氮-氧复合体	113
4.5 氢钝化	75	4 硅单晶中的氢杂质	114
第5章 硅晶体的腐蚀	76	4.1 硅单晶中氢的基本性质	114
1 单晶硅的各向异性腐蚀	76	4.2 硅单晶中氢和氧的作用	114
1.1 KOH系	76	4.3 硅单晶中氢对电活性缺陷的钝化作用	115
1.2 TWAH系	77	第9章 硅单晶中的过渡族金属杂质和吸杂	116
1.3 EDP系	77	1 过渡族金属在硅中的固溶度	116
1.4 单晶硅各向异性腐蚀的原因	78	2 过渡族金属在硅中的扩散	117
2 单晶硅的各向同性腐蚀	78	3 金属复合体	118
3 硅单晶缺陷的腐蚀和显示	78	4 金属沉淀	118
4 硅单晶的干法腐蚀	79	5 硅中过渡族金属对材料电学性能的影响	120
4.1 纯气相腐蚀法	79	6 硅中过渡族金属的吸杂原理	122
4.2 溅射刻蚀法和离子束蚀法	80	6.1 松弛吸杂机理	122
4.3 化学等离子刻蚀法和反应离子刻蚀法	80	6.2 分凝吸杂机理	122
4.4 反应离子束法	84	7 硅中过渡族金属的吸杂工艺	122
4.5 激光辅助刻蚀法	84	7.1 内吸杂工艺	122
第6章 硅晶片的加工工艺	86	7.2 外吸杂工艺	122
1 切断和滚圆	86	7.3 短程吸杂	123
2 切片和倒角	87	第10章 其他硅材料	124
3 研磨和腐蚀	88	1 铸造多晶硅	124
4 硅片的抛光	89	1.1 铸造多晶硅的研究和开发	124
5 硅片的化学清洗	90	1.2 铸造多晶硅的制备	124
5.1 硅片的沾污来源及沾污类型	90	1.3 铸造多晶硅的缺陷和杂质	127
5.2 硅片的清洗原则	90	2 非晶硅薄膜	130
5.3 硅片的清洗工艺	90	2.1 非晶硅薄膜的研究和开发	130
6 检验包装	91	2.2 非晶硅薄膜的基本性质	131
第7章 硅单晶的缺陷	93	2.3 非晶硅薄膜的制备	131
1 硅单晶中的点缺陷	93	2.4 非晶硅薄膜的缺陷及钝化	132
1.1 点缺陷的基本性质	93	3 多晶硅薄膜	132
1.2 点缺陷在硅晶体生长过程中的运动	93	3.1 多晶硅薄膜的特点	132
2 硅单晶中的原生缺陷	94	3.2 多晶硅薄膜的制备	133
2.1 原生缺陷的类型	94	第11章 硅材料的发光	136
2.2 空洞型缺陷的形成	95	1 硅材料的光学特性	136
2.3 Void的控制	97	2 硅单晶中复合与发光	137
3 硅单晶中的位错	97	3 硅中等电子中心和稀土铈的发光	138
4 硅单晶的氧化诱生层错	98	3.1 硅中等电子杂质(复合体)的发光	138
4.1 OSF的形成机制和长大规律	98	3.2 稀土铈的发光	139
4.2 OSF的收缩	99	4 硅中的缺陷发光	140
4.3 OSF的形貌	99	5 多孔硅的发光	141
4.4 环状 OSF	100	5.1 多孔硅的制备	141
5 硅单晶的工艺诱生缺陷	100	5.2 多孔硅光致发光机理	142
5.1 热应力引入的位错	100	5.3 热处理对多孔硅发光特性的影响	142
5.2 机械损伤引入的位错	100	5.4 多孔硅及其复合体系的发光特性	142
6 硅单晶的辐照缺陷	101	6 纳米硅的发光	143
第8章 硅单晶中的轻元素杂质	103	6.1 纳米晶硅嵌入 SiO ₂ 结构的制备	144
1 硅单晶中的氧杂质	103	6.2 纳米晶硅嵌入 SiO ₂ 结构发光机理	144
1.1 硅单晶中氧的基本性质	103	6.3 纳米晶硅嵌入 SiO ₂ 结构的光致发光 及其光增益	144
1.2 硅单晶中氧浓度的控制	105	参考文献	146
1.3 硅单晶中的氧施主	105	第3篇 集成电路制造技术	149
1.4 硅单晶中的氧沉淀	106	第1章 集成电路设计技术	151
1.5 硅晶体的内吸杂工艺	108	1 集成电路设计技术概述	151
2 硅单晶中的碳杂质	109		
2.1 硅单晶中碳的基本性质	109		
2.2 硅单晶中碳对氧沉淀和氧施主的作用	110		

1.1 集成电路设计	151	2.4 无机试剂的去污作用	178
1.2 集成电路设计的发展历程	151	2.5 湿法清洗设备	179
1.3 集成电路设计的分类	151	3 氧化和热处理技术	179
1.4 集成电路设计的方法学	152	3.1 二氧化硅的结构及性质	179
2 CMOS 数字集成电路设计技术	152	3.2 硅的热氧化	180
2.1 CMOS 基本数字单元	152	3.3 热处理	181
2.2 CMOS 数字集成电路设计流程	155	3.4 高温系统	182
2.3 硬件描述语言	155	4 掺杂技术	183
2.4 CMOS 数字集成电路的版图设计	156	4.1 扩散技术	184
3 CMOS 模拟集成设计技术	157	4.2 离子注入技术	185
3.1 基本 CMOS 模拟电路	157	5 薄膜淀积技术	187
3.2 模拟电路设计流程	158	5.1 薄膜特性	187
4 IP 及 SOC 设计	158	5.2 膜淀积技术	188
4.1 SOC 系统集成芯片	158	5.3 外延	191
4.2 SOC 芯片的设计模式	158	6 金属化技术	192
4.3 SOC 芯片设计的技术优势	159	6.1 金属类型	192
4.4 IP 知识产权模块	159	6.2 金属淀积系统	194
4.5 基于 IP 的 SOC 芯片设计	160	第 4 章 CMOS 器件及电路制造技术	196
4.6 IP 模块连接与芯片总线	160	1 MOS 器件的物理基础	196
4.7 芯片的验证与测试	161	1.1 MOSFET 的基本结构、工作原理及基本类型	196
4.8 SOC 设计展望	161	1.2 MOSFET 的特性和基本参数	198
5 集成电路设计的发展趋势	161	1.3 CMOS 器件中的短沟道效应及其他寄生效应	202
5.1 SOC (system on Chip) 和 SIP (System in package)	161	1.4 MOSFET 器件尺寸的等比例缩小规律	204
5.2 C/C++ 等高级语言引入到 IC 系统级设计	161	1.5 常规 MOSFET 的设计原则	205
5.3 混合信号系统设计	162	2 现代深亚微米和超深亚微米 CMOS 器件结构以及 器件物理	207
第 2 章 微细加工技术	163	2.1 早期的 CMOS 器件结构	207
1 光学曝光技术	163	2.2 现代 CMOS 器件结构	207
1.1 接触式曝光技术和接近式曝光技术	163	2.3 体硅 CMOS 器件中的门锁效应	208
1.2 光学投影成像曝光技术	163	2.4 CMOS 器件进一步缩小面临的挑战和机遇	209
1.3 193 nm 光刻技术	164	3 CMOS 集成电路典型的工艺模块	211
1.4 光掩模制造技术	165	3.1 阱工艺结构	211
2 电子束曝光技术	166	3.2 薄栅氧化	211
2.1 电子束曝光系统概述	166	3.3 非均匀沟道掺杂	211
2.2 电子束曝光系统的基本结构	167	3.4 栅电极材料	211
2.3 电子散射与邻近效应	167	3.5 源漏工程与浅结形成	212
2.4 电子束曝光技术的最新进展	169	3.6 难熔金属自对准硅化物	212
3 极紫外光刻技术	169	4 CMOS 电路的工艺集成	213
3.1 极紫外光刻技术的光源	170	4.1 CMOS 工艺集成技术的类型	213
3.2 极紫外光刻技术的成像系统	170	4.2 深亚微米 CMOS 工艺流程	213
3.3 极紫外光刻技术的光刻掩模	171	4.3 MOS 存储器技术	214
3.4 极紫外光刻技术展望	171	5 CMOS 集成技术的发展	214
4 刻蚀技术	171	第 5 章 双极型器件及电路制造技术	216
4.1 湿法腐蚀技术	171	1 双极型半导体器件的结构和物理	216
4.2 干法刻蚀技术	171	1.1 双极型半导体器件的性质	216
4.3 反应离子刻蚀	172	1.2 晶体三极管的伏安特性曲线	217
4.4 感应耦合等离子刻蚀技术	172	1.3 pn 结二极管	220
5 其他微细加工技术	173	1.4 NPN 高频双极晶体管	220
5.1 聚焦离子束技术	173	1.5 模拟集成电路中的 PNP 管	220
5.2 压印图形转移技术	175	1.6 集成电路中的无源器件	220
6 微细加工技术面临的挑战	176	1.7 双极集成电路中的基本电路	221
第 3 章 集成电路工艺技术	177	2 双极集成电路制造技术	223
1 集成电路生产环境净化技术	177	2.1 pn 结隔离的 NPN 器件结构	223
1.1 沾污的类型	177	2.2 埋层和外延层的设计和制备	223
1.2 沾污的来源与控制	177	2.3 基区和发射区的形成	224
2 化学清洗技术	178	2.4 工艺集成	224
2.1 沾污杂质的种类	178	3 先进的双极集成电路制造技术	224
2.2 硅片清洗的顺序	178	3.1 沟槽介质隔离	224
2.3 有机溶剂的去污作用	178	3.2 多晶硅发射极工艺技术	225

3.3 双层多晶硅自对准工艺	226	2.4 环境与静电对集成电路封装过程的影响	265
3.4 多晶硅的原位掺杂技术	226	3 倒装焊技术	266
3.5 异质结双极晶体管 (HBT)	226	3.1 倒装焊技术的特点和优势	266
4 BiCMOS 集成电路	227	3.2 倒装焊技术的分类	267
4.1 BiCMOS 集成电路介绍	227	3.3 倒装芯片的焊接方式	269
4.2 BiCMOS 集成电路的制造工艺技术	228	3.4 倒装焊工艺的芯片填充技术	270
4.3 BiCMOS 集成技术在数模混合电路和 系统集成中的应用	230	3.5 焊点的质量检验及相应指标	270
5 双极技术的展望	231	4 新型电子封装技术	270
第 6 章 半导体功率器件及电路	232	4.1 多芯片模块的组装技术 (MCM)	271
1 巨型晶体管 (GTR)	233	4.2 MCM-C 的主要制作工艺和技术	271
1.1 功率晶体管 (单管) GTR	233	4.3 三维立体 (3D) 封装	272
1.2 达林顿晶体管	233	4.4 系统级封装 (SIP)	272
1.3 GTR 的设计	234	参考文献	274
1.4 GTR 的终端结构设计	235	第 4 篇 硅基异质结构材料和器件	277
2 功率场效应晶体管	235	第 1 章 概述	279
2.1 VDMOS 的基本结构	235	1 信息社会呼唤新的半导体材料	279
2.2 VDMOS 的基本工作原理	236	2 硅基异质结材料——第二代硅	280
2.3 VDMOS 的主要参数	236	3 硅基异质材料和器件的发展趋势	281
2.4 VDMOS 的设计	236	第 2 章 SiGe 的晶体结构	284
3 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	238	1 晶体结构	284
3.1 IGBT 的主要工作原理	238	2 晶格常数	284
3.2 IGBT 的基本结构	238	3 SiGe 合金的相图	285
3.3 IGBT 的开关特性	238	4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的有序性	286
3.4 IGBT 的门锁效应	239	5 晶格失配和 SiGe 的临界厚度	286
3.5 IGBT 的设计	239	6 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 系的失配位错	287
4 其他功率器件	240	7 结论	289
4.1 UMOS	240	第 3 章 SiGe 的能带结构	290
4.2 LDMOS	240	1 Si 和 Ge 的能带结构	290
4.3 静电感应晶体管 (SIT)	241	2 SiGe 体材料的能带结构	291
4.4 功率集成技术	242	3 应变对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 能带结构的影响	292
4.5 VDMOS、IGBT 的新发展	243	4 应变 SiGe 合金的能带结构	294
第 7 章 化合物半导体器件和电路	244	5 SiGe 异质结的能带偏移	294
1 化合物半导体器件结构和器件物理	244	6 SiGe 的有效质量	296
1.1 GaAs MESFET	244	7 结论	296
1.2 GaAs HEMT	245	第 4 章 SiGe 的力学性质、热学性质和 Raman 光谱	297
1.3 GaAs HBT	246	1 SiGe 的力学性质	297
1.4 无源器件	249	2 SiGe 的热力学性质	297
2 化合物半导体工艺技术	250	2.1 SiGe 的线胀系数	297
2.1 刻蚀技术	250	2.2 SiGe 的热导率	298
2.2 隔离方法	251	3 SiGe 的温差电动势特性: 塞贝尔参数	299
2.3 欧姆接触	251	4 SiGe 的 Raman 光谱	299
2.4 肖特基势垒	252	5 结论	300
2.5 金属化和剥离工艺	252	第 5 章 SiGe 的电学性质和磁学性质	302
2.6 空气桥与接地	253	1 SiGe 的电子迁移率和空穴迁移率	302
2.7 背面减薄	254	1.1 Si 和 Ge 体材料的载流子迁移率	302
3 GaAs 集成电路	255	1.2 SiGe 合金的迁移率	303
3.1 MMIC 简要介绍	255	2 SiGe/Si 和 SiGe/Ge 中的二维载流子	303
3.2 实用电路举例	255	3 SiGe/Si 异质结中的载流子注入	304
4 先进的化合物半导体器件	258	3.1 Si/SiGe 同型异质结中的载流子注入模型	305
4.1 InP 基器件	258	3.2 异型异质结中的载流子注入模型	306
4.2 GaN 电子器件的原理和发展趋势	259	4 SiGe/Si 结构的磁学特性	307
4.3 SiC 电子器件的原理和发展趋势	259	4.1 SdH (Shubnikov de Haas, 舒布尼科夫—德哈斯) 效应和量子霍尔效应	307
第 8 章 集成电路的封装技术	261	4.2 二维电子气	307
1 集成电路封装的发展历程及趋势	261	4.3 二维空穴气	308
2 传统的集成电路封装技术	262	4.4 分数量子霍尔效应	308
2.1 常用的封装类型及应用范围	262	5 结论	309
2.2 引线键合是关键	264	第 6 章 SiGe 的光学性质	310
2.3 质量稳定可靠的秘诀	264		

1 SiGe 的折射率	310	3 SOI 的应用与发展趋势	347
2 SiGe 的吸收系数	311	3.1 SOI CMOS 技术	347
3 SiGe 的光荧光光谱	311	3.2 SOI CMOS 与体硅 CMOS 设计的比较	348
4 弛豫 SiGe 合金的物理参数	312	3.3 SOI CMOS 与体硅 CMOS 器件电容的比较	349
5 结论	316	3.4 SOI MOSFET 技术	349
第 7 章 SiGe (001) 的原子再构和表面性质	317	3.5 SOI MOSFET 设计	350
1 SiGe (001) 表面的原子再构和键合构形	317	3.6 新型 SOI 器件	350
2 Si 和 Ge (001) 面上的原子台阶	318	4 SOI 技术的发展趋势	353
2.1 准确定向的 Si (001) 表面的台阶	319	第 11 章 硅基二氧化硅材料	354
2.2 倾斜角度大的 (4°) Si (001) 表面上的台阶	319	1 生长机制及动力学	354
2.3 小角 ($0.3^\circ \sim 1^\circ$) 倾斜 Si (001) 表面上的台阶	319	2 制备方法与系统	356
3 SiGe 层生长过程中 Ge 和掺杂原子的分凝	319	2.1 预氧化清洗	356
3.1 Si 上 Ge 的表面分凝	320	2.2 干法、湿法和 HCl 干法氧化	356
3.2 掺杂剂在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 外延层中的分凝	321	2.3 高压氧化	356
3.3 Sb 在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 上的分凝	321	2.4 等离子氧化	356
3.4 B 在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 上的分凝	321	3 氧化膜的特性	357
4 SiGe 外延生长的表面抑制剂	322	3.1 二氧化硅的掩蔽特性	357
4.1 氢	322	3.2 氧化电荷	357
4.2 铈	322	3.3 氧化应力	357
4.3 铍	322	4 Si-SiO ₂ 界面	357
4.4 镓	322	4.1 Si 和 SiO ₂ 的物理性质	358
4.5 锡	322	4.2 Si-SiO ₂ 界面态研究成果	358
5 结论	322	4.3 Si-SiO ₂ 界面态的理论计算模型	358
第 8 章 SiGeC/Si 异质结	323	5 多晶硅氧化	359
1 SiGeC 的应变补偿	323	5.1 多晶硅的氧化方法	359
2 SiGeC 的能带图	324	5.2 多晶硅的氧化模型	360
3 SiGeC 的电学性质	326	5.3 多晶硅的氧化特性	360
3.1 SiGeC 的空穴输运特性	326	6 硅基二氧化硅光波导材料	360
3.2 SiC 结构的电子输运特性	327	6.1 硅基二氧化硅光波导材料的生长方法和机制	361
4 SiGeC 的光学性质	327	6.2 二氧化硅膜折射率及厚度的测试	361
5 SiGeC 的应用与发展趋势	328	6.3 二氧化硅厚膜的刻蚀	362
6 结语	329	第 12 章 Si 基异质结构的外延生长	363
第 9 章 硅基 III-V 族半导体异质结构	331	1 SiGe/Si 异质结构材料的生长设备和方法	363
1 硅与 III-V 族材料的结构差异	331	2 外延衬底材料的清洁处理	364
1.1 硅结构	331	3 应变 SiGe 材料的生长	365
1.2 III-V 族材料结构	331	4 SiGe 弛豫衬底的生长	365
2 外延生长的硅基 III-V 族异质结构	332	5 自组装 Ge 量子点的生长	366
2.1 外延生长难点	332	5.1 Ge 量子点的形貌演化	367
2.2 大失配异质结构中的位错	333	5.2 Ge 量子点尺寸的控制和密度的提高	367
2.3 硅基闪锌矿异质外延生长难点的几种应对方法	334	5.3 Ge 量子点的有序性控制	368
2.4 硅基纤锌矿异质结构	336	第 13 章 Si 基异质结构电子器件	371
3 键合制备的硅基 III-V 族异质结构	339	1 SiGe/Si HBT 的基本原理	371
3.1 制备方法及其难点	339	2 SiGe HBT 的制造工艺	371
3.2 键合的硅基砷化镓 (GaAs/Si)	340	2.1 两种典型的 HBT 结构	372
3.3 键合的硅基氮化镓 (GaN/Si)	340	2.2 SiGe HBT 的制作工艺	372
3.4 键合的硅基磷化铟 (InP/Si)	341	2.3 与工艺相关的寄生效应	373
4 硅基 III-V 族异质结构的展望	341	3 SiGe HBT 的特性	374
第 10 章 SOI 材料和器件	342	3.1 SiGe HBT 的直流特性	374
1 SOI 的制备方法	343	3.2 SiGe HBT 的交流特性	375
1.1 键合-背面腐蚀技术	343	3.3 SiGe HBT 的噪声特性	376
1.2 注入氧分离技术	343	4 SiGe HBT 的应用	376
1.3 智能剥离技术	344	4.1 低噪声放大器 (LNA)	377
2 SOI 的电学和光学性质	345	4.2 SiGe 功率放大器 (PA)	377
2.1 SOI 材料的表征技术	345	4.3 电压控制振荡器 (VCO)	377
2.2 SOI 材料的晶体质量	345	4.4 集成电路中高 Q 值的无源器件	378
2.3 SOI 材料的载流子寿命和表面复合	346	5 其他硅基电子器件	378
2.4 SOI 材料的 Si-SiO ₂ 界面	347	5.1 Si/SiGe 调制掺杂场效应晶体管	

(Si/SiGe MODFET)	378	1.4 InP 中的深能级杂质	423
5.2 Si 基 MOS 器件	379	1.5 过渡族金属杂质的光学性质	424
5.3 各种晶体管噪声的比较	381	1.6 GaAs 中氢-杂质复合体的振动模式	425
第 14 章 硅基光电子器件	383	1.7 GaAs 中独立杂质的振动模式	426
1 硅基发光器件	383	1.8 GaAs 中替位杂质复合体的振动模式	426
1.1 硅基发光二极管	384	1.9 InP 中的杂质及杂质复合体的振动模式	427
1.2 硅基激光器	384	1.10 杂质的扩散	427
2 硅基光电探测器	385	1.11 GaAs 中杂质的扩散	427
2.1 SiGe/Si MQWs RCE 光电探测器	385	2 缺陷	428
2.2 Ge 量子点光电探测器	386	2.1 点缺陷	428
3 硅基光波导器件	386	2.2 线缺陷	430
3.1 硅基光波导材料	387	2.3 面缺陷	431
3.2 SOI 光波导	387	2.4 沉淀物	432
3.3 MMI 和光波导耦合器	387	第 4 章 GaAs 和 InP 的测试表征	435
3.4 SOI CMOS 高速光调制器	388	1 结构参数的测试表征	435
3.5 SOI 光波导开关	388	1.1 X 射线的衍射及形貌	435
3.6 阵列波导光栅 (AWG)	390	1.2 化学腐蚀坑密度 (EPD)	436
4 硅基光电子集成	390	1.3 二次离子质谱 (SIMS)	438
5 结束语	390	1.4 透射电子显微镜 (TEM)	439
参考文献	392	1.5 红外吸收	440
第 5 篇 化合物半导体材料	393	1.6 喇曼 (Raman) 谱	441
第 1 章 CaAs 和 InP 的结构和性质	397	1.7 电感耦合等离子体质谱/光谱 (ICP-MASS/AES)	443
1 GaAs 的晶体结构和性质	397	1.8 正电子湮灭 (PAT)	445
1.1 晶体结构	397	2 电学参数的测试表征	446
1.2 能带结构	397	2.1 Hall 测试	446
1.3 电学性质	398	2.2 深能级瞬态谱	448
1.4 高场强下的输运性质	399	2.3 电子回旋共振	448
1.5 复合特性	400	3 光学特征的测试表征	449
1.6 光学特性	401	第 5 章 GaAs 和 InP 的应用	451
1.7 热力学性质	402	1 微电子应用	451
1.8 力学性质	403	1.1 金属半导体场效应晶体管	452
1.9 GaAs 的化学性质	404	1.2 高电子迁移率晶体管 (HEMT)	454
2 磷化铟的基本属性	404	1.3 异质结双极晶体管	457
2.1 InP 的晶格结构	404	1.4 微波二极管	461
2.2 磷化铟的能带结构	405	1.5 其它器件	463
2.3 InP 的电学性质	406	2 光电子应用	463
2.4 高电场下的输运性质	407	2.1 LED (发光二极管)	463
2.5 InP 的电离效应	408	2.2 LD (激光器)	465
2.6 InP 的复合参量	408	2.3 OEIC	466
2.7 InP 的光学性质	408	2.4 光伏器件	466
2.8 InP 的力学性质	409	2.5 光探测器/光电开关	467
2.9 InP 的热学性质	409	2.6 InP 基激光器和探测器	467
2.10 InP 的热力学性质	410	3 其他应用	468
2.11 化学性质	411	第 6 章 其他常见化合物半导体材料	471
第 2 章 GaAs 和 InP 单晶的制备	413	1. CaP	471
1 晶体生长基本原理	413	2. GaSb	472
2 晶体生长技术	413	3 砷化铟 (InAs) 和锑化铟 (InSb)	472
3 工艺流程	415	4 硫化铅 (PbS) 和硒化铅 (PbSe)	473
3.1 多晶合成	415	5 II - VI 族半导体材料	474
3.2 单晶生长工艺	416	6 其他材料 (InGaAs、AlGaAs、InAlAs、InGaP 等)	476
3.3 退火处理	418	参考文献	477
3.4 大直径晶体的发展	418	第 6 篇 宽带隙半导体及其应用	479
4 晶片加工	418	第 1 章 概述	481
第 3 章 GaAs 和 InP 中的杂质和缺陷	421	1 宽带隙半导体材料的类型	481
1 杂质	421	2 宽带隙半导体材料的发展概况	481
1.1 GaAs 和 InP 中浅杂质的性质	421	3 宽带隙半导体材料的特点	482
1.2 GaAs 和 InP 中杂质的分凝和溶解	422		
1.3 GaAs 中的深能级杂质	422		

3.1 压电性与极化效应	482	3.5 缺陷相关的光学性质	528
3.2 高热导率	483	4 III族氮化物半导体异质结构与量子结构	529
3.3 小介电常数	483	4.1 异质结构能带及电子能态	529
3.4 极高临界击穿电场	483	4.2 异质结构中的二维电子气	530
3.5 耐高温、抗辐照	483	4.3 量子阱和量子点	531
3.6 大激子束缚能	483	5 低维III族氮化物半导体输运性质	533
3.7 巨大能带偏移 (Band offset)	483	5.1 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构的经典输运性质	533
4 宽带隙半导体材料的技术应用	483	5.2 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结构的量子输运性质	535
4.1 短波长发光器件	483	第4章 III族氮化物半导体器件的应用	537
4.2 高温、高功率、高频电子器件	484	1 III族氮化物半导体光发射器件 (LED)	537
4.3 探测器	485	1.1 LED 的基本工作原理与性能参数	537
4.4 正在探索中的新技术应用领域	485	1.2 GaN 基 LED 材料的生长、结构及器件工艺	537
5 宽带隙半导体材料面临的几个科学技术问题	486	1.3 GaN 基 LED 的发展展望	542
5.1 缺乏实用性的体单晶材料	486	2 III族氮化物半导体激光器 (LD)	542
5.2 高缺陷密度	486	2.1 III族氮化物半导体激光器的物理基础	542
5.3 化学比的偏离与掺杂的不对称性	486	2.2 条形III族氮化物半导体激光器和 大功率激光器	545
第2章 III族氮化物半导体材料	487	2.3 分布反馈 (DFB/DBR) III族氮化物半导体 激光器	547
1 III族氮化物半导体材料的晶体结构	487	2.4 垂直腔面发射III族氮化物半导体激光器	547
1.1 III族氮化物半导体材料的晶体结构	487	2.5 其他类型的III族氮化物半导体激光器	548
1.2 不同氮化物的晶体结构和基本物理性质	488	3 III族氮化物半导体光电探测器	549
2 宽带隙化合物半导体材料的制备技术	493	3.1 III族氮化物紫外光电探测器的应用背景和 发展概况	549
2.1 分子束外延	494	3.2 紫外光电探测器的基本工作原理和 主要性能参数	550
2.2 金属有机化学气相外延	497	3.3 III族氮化物光导型探测器	551
2.3 氢化物输运气相外延	499	3.4 III族氮化物肖特基势垒光电二极管和 M—S—M 型探测器	551
3 III—V—N 化合物半导体	503	3.5 III族氮化物 p-i-n 型光电二极管	552
3.1 GaN、GaP 和 GaAs 的基本物理参数	503	3.6 III族氮化物其他类型的探测器和焦平面阵列	553
3.2 III—V—N 化合物半导体的能带弯曲	503	4 III族氮化物半导体电子器件	555
3.3 III—V—N 化合物半导体的微结构性质	503	4.1 III族氮化物半导体应用于电子器件的优势	555
3.4 III—V—N 化合物半导体的光学性质	505	4.2 主要的III族氮化物电子器件	556
4 氮化镓半导体材料	505	4.3 III族氮化物电子器件发展面临的主要材料、 物理和器件问题	558
4.1 InN 材料的重要性质	506	第5章 氧化锌 (ZnO) 半导体	560
4.2 InN 材料的研究历史和进展	507	1 ZnO 材料的结构与性质	560
4.3 InN 材料的生长	507	1.1 ZnO 的基本结构	560
4.4 InN 的衬底和缓冲层	509	1.2 ZnO 的化学配比与本征物性	560
4.5 InN 的晶体结构和化学性质	510	1.3 ZnO 半导体单晶体材料的制备	561
4.6 InN 的电学性质	511	2 ZnO 半导体薄膜的制备	561
4.7 InN 的光学性质	512	2.1 ZnO 薄膜的制备方法	561
4.8 InN 基器件的研究进展	513	2.2 晶态 ZnO 薄膜的生长技术	563
4.9 总结	513	2.3 ZnO 薄膜的制备方法与生长技术比较	563
5 III族氮化物半导体材料的杂质与缺陷	514	3 ZnO 半导体的物理性质	564
5.1 本征缺陷	514	3.1 ZnO 半导体中的掺杂与电学性质	564
5.2 非本征缺陷和掺杂	516	3.2 ZnO 的光学性质	566
5.3 GaN 中的氢和氢复合体	517	3.3 ZnO 的压电性质	568
5.4 其他缺陷	518	3.4 ZnO 的合金性质与能带工程	568
5.5 展望	519	4 ZnO 半导体技术的应用	569
第3章 III族氮化物半导体的基本物理性质	520	4.1 技术应用范围	569
1 III族氮化物半导体的电子能带结构	520	4.2 ZnO 的器件工艺	570
1.1 III族氮化物半导体电子能带结构的计算	520	4.3 ZnO 光电器件	570
1.2 III族氮化物的电子能带结构	521	4.4 气体传感器	571
2 III族氮化物半导体的自发极化与压电极化	523	4.5 压敏器件	572
2.1 自发极化	524	4.6 表面声波器件 (SAW)	572
2.2 压电极化	524	第6章 碳化硅半导体	574
2.3 III族氮化物异质结构中的自发极化 与压电极化	524	1 SiC 半导体材料的结构与特性	574
3 III族氮化物半导体的光学性质	525		
3.1 基本光学函数	525		
3.2 高于带隙能的光学性质	526		
3.3 靠近带边的光学性质 (激子效应)	526		
3.4 低于带隙能的光学性质 (折射率)	528		

1.1 晶体结构与多形体	574	3.2 选择生长和表面形貌	609
1.2 禁带宽度及其器件应用	576	3.3 金刚石薄膜的掺杂	610
1.3 临界电场与高击穿电压	576	4 金刚石半导体的基本物理性质	613
1.4 饱和漂移速度及高频优势	576	4.1 异质外延金刚石膜的电学性质	614
1.5 高热导率及大功率优势	576	4.2 金刚石的欧姆接触	614
1.6 力学性能和化学性质	576	5 金刚石半导体技术的应用	615
1.7 器件性能的评价——品质因子	576	5.1 金刚石 p-n 结二极管	615
2 SiC 半导体晶体的制备	576	5.2 肖特基二极管	615
2.1 SiC 相图与 SiC 液相的生长	576	5.3 场效应晶体管	617
2.2 Lely 法生长 SiC 单晶	577	5.4 金刚石薄膜紫外光探测器	618
2.3 改进的 Lely 法	578	第 8 章 II-VI 族化合物半导体	619
3 SiC 半导体薄膜的制备	581	1 II-VI 族化合物半导体材料的制备	619
3.1 SiC 的气相外延生长	581	1.1 MOCVD 法制备 II-VI 族化合物	619
3.2 近年来 SiC 气相外延生长工艺的改进	582	1.2 II-VI 族化合物的衬底选择以及其他生长技术	620
3.3 新一代热壁化学气相外延反应装置	585	1.3 II-VI 族化合物的掺杂	620
3.4 SiC 液相的外延生长	586	2 II-VI 族化合物的半导体性质	622
4 SiC 的物理性质	587	2.1 II-VI 族化合物的晶体结构性质	622
4.1 SiC 的基本物理性质	587	2.2 II-VI 族化合物能带结构性质	622
4.2 SiC 的光学性质	590	2.3 II-VI 族化合物的光学性质	623
4.3 SiC 的载流子性质和能带结构	593	2.4 II-VI 族化合物的补偿效应	625
4.4 SiC 中的能级	596	3 ZnSe 基化合物半导体的异质结构	625
5 SiC 半导体技术的应用	597	4 ZnSe 基化合物半导体技术的应用	627
5.1 SiC p-n 结、肖特基接触、欧姆接触	597	4.1 ZnSe 基蓝绿光发光二极管	627
5.2 SiC FETs	597	4.2 ZnSe 基白光二极管	627
5.3 SiC 双极型晶体管、负阻管、晶闸管	597	4.3 ZnSe 基激光二极管	627
5.4 功率微波器件	597	4.4 n-型和 p-型 ZnSe 的欧姆接触	627
5.5 紫外光电二极管	597	4.5 II-VI 族材料在太阳能电池和探测器等方面的应用	628
5.6 集成电路	597	第 9 章 宽禁带稀释磁性半导体材料	629
5.7 有关 SiC 器件的一些应用	598	1 稀磁半导体的磁性机制	630
第 7 章 金刚石半导体	600	2 稀释磁性半导体材料的制备	631
1 金刚石半导体材料的结构与特性	600	2.1 分子束外延	631
1.1 金刚石结构	600	2.2 离子注入	632
1.2 类金刚石材料的相结构	601	2.3 氢化物气相外延	632
1.3 金刚石的特性	601	2.4 溶胶-凝胶	633
2 金刚石材料的制备	602	3 III-V 族稀释磁性半导体材料的磁性质	634
2.1 微波等离子体法	603	3.1 (Ga, Mn) P	634
2.2 等离子体喷射法	604	3.2 (Ga, Mn) N	634
2.3 热丝法	604	4 ZnO 基稀释磁性半导体	635
2.4 其他 CVD 方法	605	参考文献	637
3 金刚石半导体薄膜的制备与掺杂	607		
3.1 在各种衬底上的异质外延和高取向金刚石膜	607		

第 1 篇

概 论

■ 主 编 王占国

■ 编 写 王占国

物质、能量和信息是构成世界的三大要素。信息，也称之为消息。在信息论中指用符号传递的报道，报道的内容是接受符号者预先不知道的。信息更一般的定义是指事务的运动状态和关于运动状态的陈述。直到 20 世纪初，人们才认识到信息是一种可再生、可复制和重复使用的重要资源；今天，信息的概念已超越互相联系、了解社会行情的范畴，而成为指导社会活动、保障社会安全和参与社会财富创造的关键要素。准确、快速、安全地获得信息关系到一个国家的兴衰存亡，各国政府都很重视。信息科学是研究信息现象及其运动规律的科学，而信息技术则是指利用计算机和现代通信

等手段获取、传递、存储、处理、显示信息和分配信息的技术。信息材料是指信息技术所用的新材料。根据其在信息技术中的功能可分为：信息获取（传感）材料，信息传输材料，信息存储材料，信息显示材料与器件和信息处理材料、器件与电路等。本大典信息功能材料卷在对上述相关的主要信息功能材料进行重点介绍的同时，还将对近年来得到迅速发展、并在未来的信息技术中有着潜在应用前景的纳米材料、自旋电子材料、高温超导材料、宽带隙半导体材料、半导体低维结构材料与器件和光子晶体材料等做较详细的描述。

第 1 章 信息功能材料在信息技术中的战略地位

信息学科和技术已经渗透到政治、经济、军事和文化等现代社会的各个重要领域，已成为 21 世纪国际竞争的制高点。美国、日本和德国等都把信息技术作为国家战略给予高度重视和重点支持，力图在该领域保持其领先地位。党的十六大报告也明确指出信息化是我国加快实现工业化和现代化的必然选择。信息技术和信息产业的发展已成为一个国家综合实力的决定性因素。国民对信息的拥有和利用程度成为衡量一个国家发展水平的指标。

随着信息技术向数字化、网络化的迅速发展，超大容量信息传输、超快实时信息处理和超高密度信息存储（ 3 T , $1\text{ T}=10^{12}$ ）已成为信息技术追求的目标。要实现这个目标，信息技术要有一个飞跃的发展，要实现信息技术的飞跃，信息功能材料和器件必须先行。从信息技术的发展历史，我们可以清楚的看到，信息功能材料是信息科学技术的先导和基础。20 世纪 40 年代末 50 年代初，晶体管的发明、硅单晶材料和硅基集成电路的研制成功，导致了电子工业大革命；今天，以 PC 机为代表的桌式计算机进入到千家万户。光导纤维材料和以砷化镓（GaAs）材料为基础的半导体激光器的发明，使人类进入到光纤通信和高速、宽带信息网的时代。20 世纪 70 年代，超晶格概念的提出，分子束外延（MBE）、金属有机物化学气相淀积（MOCVD）等生长技术发展以及超晶格、量子阱材料的研制成功，使半导体器件的设计思想由“杂质工程”发展到“能带工程”，出现了器件的电学、光学性质可剪裁的新范畴，为材料和器件科学家提供了一个施展才能和创新的广阔天地。

巨磁阻材料发展和应用使相应的磁盘的存储密度提高到 $10\sim 100\text{ G/in}^2$ 。目前，虽然一般的光存储技术已经成熟，一次性和可擦写的光盘业已商业化，然而 20 世纪 90 年代末 GaN 蓝色、紫色激光材料和激光器的研制成功，不仅由于光波波长的变短，使光盘的光存储密度成倍增长，而且极有可

能触发新的照明光源的革命。正在发展中的三维光存储技术、全息存储技术和近场光存储等可将存储密度提高到太比特（Tbs）/ cm^2 ，其中的关键是探索制备可实用化的光存储材料。有机电致发光材料的发展和应用，开辟了研制低成本、全色高亮度柔性显示屏的新方向。

半导体量子级联激光器理论的提出和中、远红外量子级联激光材料与器件的研制成功，为实现自由空间光通信、电子对抗和大气污染的监控等奠定了技术基础。大功率量子阱激光材料、器件和激光晶体的实用化以及非线性光学晶体的发明，开辟了全固态激光的新领域。全固态激光器以其高效、小型、长寿命等优越的特性在科学研究、医疗、加工、光存储、激光显示、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、海下探潜、激光武器以及可控核聚变等领域都有着极其重要的应用前景，已成为目前国际研发的热点。

基于量子力学效应的纳米电子、纳米光电子材料与器件（如单电子器件、单光子器件和量子点激光器等），自旋电子材料与器件和光子晶体材料等将在量子计算、量子通信、全光计算和全光通信等崭新领域发挥关键作用。从原子、分子或纳米尺度的水平上控制、操纵和制造功能强大的人工“原子”结构与器件的实现，必将触发新的技术革命。纳米科学与技术的发展和运用将不仅深刻地改变世界经济、政治格局和战争的对抗形式，而且也必将彻底地改变人类的生产和生活方式。

独立自主地发展我国的信息功能材料和器件，不仅对带动我国相关产业实现技术跨越，提升我国经济和产业的国际竞争力，实现我国经济社会的可持续发展和巩固国防、保障国家安全以及科技进步等有着不可替代的作用，而且还将对空间站及空间信息系统，大型飞机，探月飞行和深空探测以及载人飞行等重大工程提供强有力的技术支撑。

编写：王占国（中国科学院半导体研究所）

第2章 信息功能材料的发展现状和趋势

信息功能材料和器件作为21世纪信息社会高新技术产业发展的基础,涉及到信息获取、发射、传输、接收、处理、存储和显示等各个方面,包括半导体微电子、光电子材料、器件和电路以及微加工技术,传感器材料和器件,通信光纤材料,存储材料,发光材料,红外材料,显示材料,稀土磁性材料和自旋电子材料,全固态激光器及其相关材料,光子晶体材料,储能材料,纳米材料和超导材料等。下面就几种关键的信息功能材料和器件的发展现状与趋势做简单叙述。

1 半导体硅材料

1.1 硅材料的发展现状

微电子的基础材料是硅材料,包括高纯多晶硅、单晶硅、外延硅片和硅基材料(SOI、SiGe和应变硅)等,与其相关的配套材料包括电子化工材料、框架、引线等封装材料。这些基础材料和配套材料与微电子工业的发展紧密相关,它们的发展直接关系到微电子工业的进步。硅材料产业经过多年的发展和竞争,国际硅材料行业出现了垄断性企业,日本、德国等国的八大硅片公司的销量占硅片总销量的90%以上,其中信越、SUMCO、WACKER(瓦克)和MEMC四家的销售额占世界硅片销售额的70%以上,其中前三家公司2003年的销售额分别为19亿美元、14亿美元和9亿美元,分别占国际市场的30%、22%和14%,决定着国际硅材料的价格和高端技术产品市场。这些企业基本上分布在日本、美国和德国,其中以日本的硅材料产业最大,占据了国际硅材料行业的半壁江山。

多晶硅主要企业海姆洛克(美国)、先进硅(美国)、瓦克(德国)、德山曹达(日本)、MEMC(美国、意大利)、三菱(日本)和高纯硅(日本)等,占据了多晶硅市场的80%以上;单晶硅和外延片的生产企业主要有信越(日本)、三菱住友SUMCO(日本)、MEMC(美国)、瓦克(德国)、小松(日本)、东京陶瓷(日本)等。多晶硅是单晶硅的原料,1975年全世界多晶硅产量为1700 t,1985年上升为4500 t,1995年增至11500 t,2000年多晶硅总产量约23000 t,2002年约26000 t,国际市场需求量以每年10%~12%的速度增长,2005年,全球需求达37000 t,2010年将达到60000 t。

2000年世界单晶硅的产能约1万吨/年,年消耗量为6000~7000 t;硅单晶片产量约35483.8亿平方毫米(55亿平方英寸),硅片年销售额为60~80亿美元。其中集成电路用硅单晶占80%,分立器件用硅单晶占20%;在集成电路用硅单晶中,203.2 mm(8 in)的硅片占主流,约40%~50%,152.4 mm(6 in)的硅片占30%,其他的是127 mm(5 in)以下的硅片。

在20世纪末,日本的硅材料公司都具备了304.8 mm(12 in)硅单晶的生产能力,到1998年6月,日本信越(SEH)公司已经具有月产2万片的能力,其5大公司的月总产能已经达到近4万片。到2001年,全世界304.8 mm(12 in)硅单晶的月产量已经达到20万片,预计2004年达到月40万片。我们知道,当硅片的直径从203.2 mm(8 in)到304.8 mm(12 in)时,每片硅单晶的芯片数增加2.5倍,成本约降低30%,因此,国际大公司都在发展304.8 mm(12 in)硅晶体。目前304.8 mm(12 in)硅片正处在发展阶

段,并以70%的年平均速度增长,所占市场份额2005年达19%。根据美国“半导体工业协会”(SIA, Semiconductor Industry Association)提出的“国际半导体技术指南”(ITRS, International Technology Roadmap for Semiconductor),到2010年左右,304.8 mm(12 in)硅片将成为主流产品。

目前,硅外延片数量大约占抛光片的三分之一,而价格约为抛光片的1.6~1.7倍。根据报道预测,硅外延片2002年的需求为6321.92亿平方毫米(9.799亿平方英寸)、2003年为7709.66平方毫米(11.95亿平方英寸)、2004年8490.31亿平方毫米(13.16亿平方英寸)、2005年9064.50亿平方毫米(14.05亿平方英寸)、2006年9703.21亿平方毫米(15.04亿平方英寸)、2007年将达到10670.95亿平方毫米(16.54亿平方英寸),增长率为11.9%。另外,随着集成电路工艺向纳米尺度发展,对硅片质量和成本都提出了越来越苛刻的要求,硅基材料(包括SOI, SiGe/Si和应变硅)将得到更多的关注,并发挥重要作用。市场调查表明,2005年SOI材料市场达到4亿~6亿美元,折合203.2 mm(8 in)SOI圆片约为100万~150万片。而SiGe HBT已在无线移动通信、无线接入局域网、卫星通信、GPS定位导航等领域得到广泛应用,IBM已建成4条SiGe生产线,产品供不应求。

对于其他微电子配套材料,随着微电子技术的发展、同样有着强烈的市场需求。以框架引线用铜带为例,1982~1998年间平均年增长率为15%,1998年产量为15万吨,主要集中在日本、德国等国,其中日本是主要的生产国家,约占世界框架引线用铜带总产量的2/3。

1.2 发展趋势

从提高硅集成电路(ICs)成品率、提高性能和降低成本来看,增大直拉硅单晶的直径,解决硅片直径增大导致的缺陷密度增加和均匀性变差等问题,仍是今后硅单晶发展的大趋势。203.2 mm(8 in)硅片已普遍用于集成电路的生产,硅ICs工艺由203.2 mm(8 in)向304.8 mm(12 in)的过渡也将在近年内完成,目前203.2 mm(8 in)和304.8 mm(12 in)的硅片量(平方英寸)已经占整个硅片量的63%,其中304.8 mm(12 in)硅片增长更快。据Gartner Dataquest 2001年7月预测,2003年304.8 mm(12 in)的硅片将达到4316.12亿平方毫米(6.69亿平方英寸),占总产量的10.6%,到2006年将达到12045.14亿平方毫米(18.67亿平方英寸),将占总产量的21.2%左右;到2015年后(12 in)硅片将成为主流产品,2020年将会达到高峰。从2016年以后,将逐步向22 nm线宽的457.2 mm(18 in)硅片过渡,届时457.2 mm(18 in)的硅片将投入生产;直径685.8 mm(27 in)硅单晶研制也正在积极筹划中。2001年和2004年已分别实现了130 nm和90 nm量产,2007年实现特征尺寸65 nm,2010年实现特征尺寸45 nm,2013年实现特征尺寸32 nm,2016年实现特征尺寸22 nm量产。事实上,目前Samsung公司已经推出了60 nm的存储芯片,Intel公司也展出该公司的60 nm的处理器,预计2005年将进入商业化的生产阶段。另外,根据2001年ITRS预测,2022年硅集成电路的特征尺寸将达到10 nm。由此可见,在未来的近20年内集成电路的发展仍将遵照摩尔定律,不过当集成电路的特征尺寸进入50 nm以下时,集成电路将进入到集成系统(SOC)的发展阶段。

从进一步缩小器件的特征尺寸,提高硅ICs的速度和集