



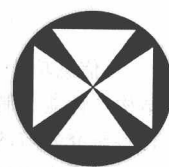
XINXI
GONGNENG
CAILIAO
SHOUCE

信息功能 材料手册

王占国 陈立泉 屠海令 主编



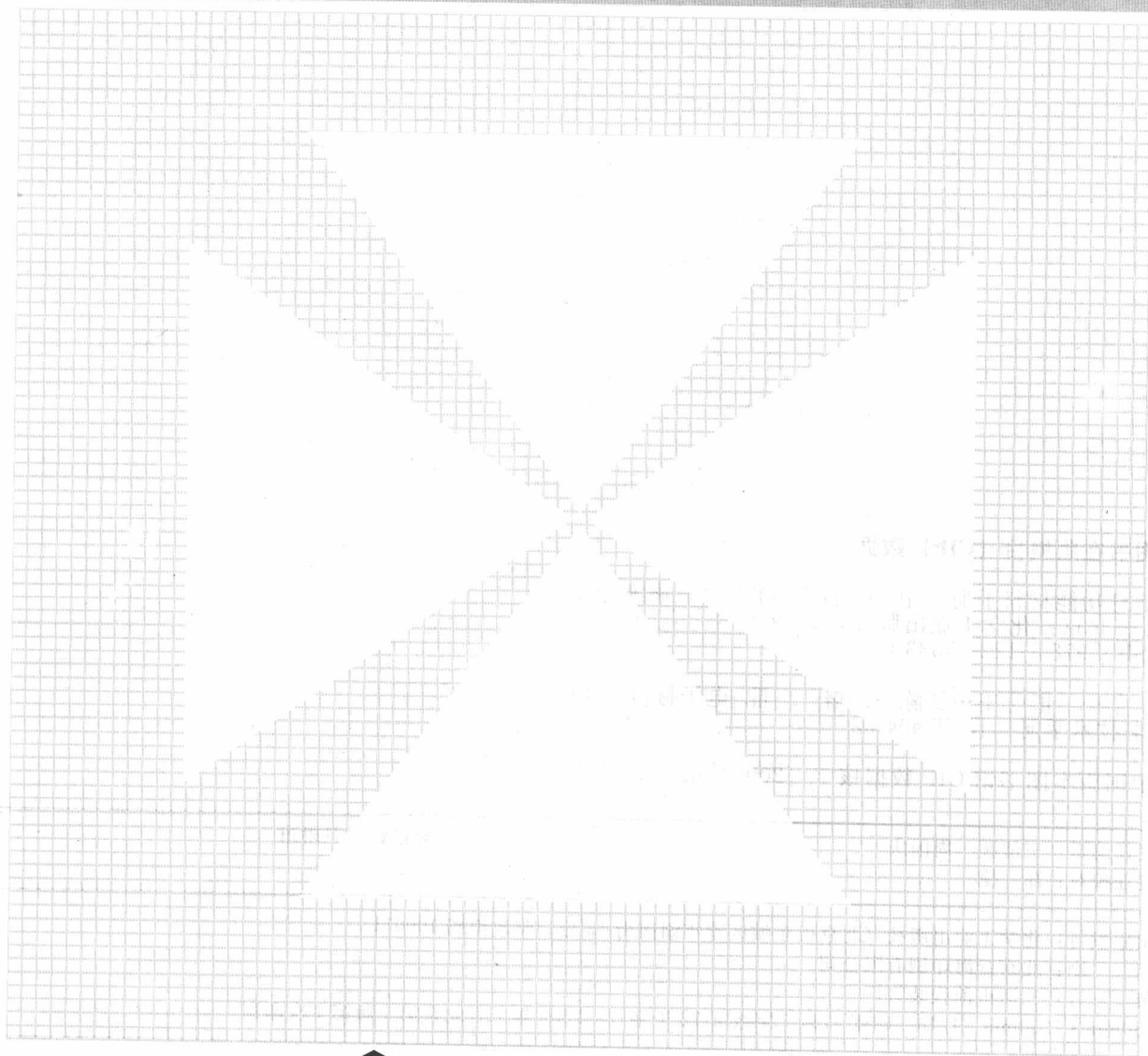
化学工业出版社



信息功能材料手册

〔中〕

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. 中/王占国, 陈立泉, 屠海令主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-122-05333-6

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 057703 号

责任编辑: 王清颖 周国庆
责任校对: 郑捷

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 47½ 字数 2172 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: 150.00 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 世纪将是以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	陈晚慈	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	姜晚霞	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7篇 半导体低维结构和量子器件	1
第1章 概述	3
1 半导体低维结构的定义	3
2 半导体低维结构材料的基本特性	3
2.1 量子尺寸(约束)效应	3
2.2 量子隧穿效应	4
2.3 库仑阻塞效应	4
2.4 量子干涉效应	5
2.5 二维电子气和量子霍尔(Hall)效应	5
3 半导体低维结构的制备技术	5
3.1 分子束外延(MBE)技术	5
3.2 金属有机物化学气相淀积(MOCVD)技术	6
3.3 半导体微结构材料生长和精细加工相结合的制备技术	6
3.4 应变自组装纳米半导体结构生长技术	6
4 半导体低维结构材料的评价技术	6
4.1 近场光学显微镜	6
4.2 显微拉曼光谱技术	7
5 半导体量子器件	8
5.1 低维结构半导体电子器件	8
5.2 低维结构半导体光电子器件	9
6 半导体低维结构材料和量子器件的发展趋势	11
第2章 半导体低维结构物理	12
1 GaAs/AlGaAs 调制掺杂异质结构中的二维电子气	12
1.1 二维电子(2DEG)的形成	12
1.2 2DEG的能级结构	12
1.3 2DEG的面密度 N_s	13
1.4 2DEG的散射机制	14
1.5 强磁场中的2DEG	15
1.6 量子霍尔效应	15
2 量子阱和超晶格	18
2.1 计算电子能级结构的包络函数模型	18
2.2 量子阱的能级结构	18
2.3 超晶格的能级结构	20
2.4 量子阱、超晶格的光学性质	21
2.5 双势垒结构中的共振隧穿现象	23
3 量子线和量子点	25
3.1 量子线的电子能级结构	25
3.2 量子点的电子能级结构	25
3.3 量子线、量子点的光学性质	27
第3章 半导体低维结构材料的制备技术	32
1 金属有机气相外延	32
1.1 生长系统	32
1.2 原材料	33
1.3 生长机构	37
1.4 化合物半导体材料的外延生长	42
2 分子束外延(molecular beam epitaxy)	53
2.1 设备	54
2.2 基本原理	55
2.3 生长技术	57
2.4 MBE的衍生技术	59
2.5 分子束外延材料及其应用	61
3 半导体低维结构材料的制备方法	64
3.1 晶格匹配 GaAs/AlGaAs 量子阱材料的MBE生长技术	64
3.2 量子阱结构的应变异质外延生长	65
3.3 层状异质结构生长与精细加工相结合制备量子线、量子点结构	65
3.4 量子线、量子点的化学合成方法	66
3.5 量子线的VLS生长技术	66
3.6 量子线的MBE直接生长方法	66
3.7 应变自组装生长量子点、量子线结构	67
3.8 量子点的可控生长技术	69
第4章 半导体低维结构材料的评价技术	73
1 透射电子显微分析技术	73
1.1 工作原理	73
1.2 TEM结构	73
1.3 工作模式	73
1.4 TEM制样	74
1.5 应用实例	74
2 扫描电子显微镜技术	75
2.1 工作原理	75
2.2 工作模式	75
2.3 SEM样品制备	76
2.4 应用实例	76
3 扫描隧道电流显微镜技术	76
3.1 工作原理	76
3.2 隧道电流谱	76
3.3 半导体样品的制备和处理	77
3.4 应用实例	77
4 原子力显微镜(AFM)测试技术	78
4.1 工作原理	78
4.2 AFM工作模式	78
4.3 针尖效应	79
4.4 AFM的应用	79
5 X射线散射(XRD)技术	79
5.1 工作原理	79
5.2 X散射技术的种类	80
5.3 倒格子空间的扫描模式	81
5.4 应用	81
6 荧光光谱和荧光激发光谱技术	82
6.1 工作原理	82
6.2 实验装置	82
6.3 空间分辨PL谱技术	83
6.4 应用实例	83
7 反射高能电子衍射	84
7.1 工作原理	84
7.2 RHEED的应用	84
8 反射差分谱	85
8.1 工作原理	85
8.2 应用实例	86
第5章 半导体高频、高速微电子器件及其应用	88
1 场效应器件	88
1.1 GaAs MESFET	89
1.2 GaAs HEMT	89

1.3 InP HEMT 器件	91	参考文献	137
1.4 MHEMT (Metamorphic High Electron Mobility Transistor, 变晶格高电子迁移率晶体管)	92	第 8 篇 存储材料	141
1.5 InAs HEMT	93	第 1 章 概述	143
1.6 GaN HEMT	93	1 光盘存储技术的发展	143
2 异质结双极晶体管 (HBT)	95	2 高密度光盘存储材料	144
2.1 GaAs HBT	96	2.1 可录型光盘存储材料	144
2.2 InP HBT	97	2.2 相变型光盘存储材料	144
2.3 MHBT (Metamorphic Heterojunction Bipolar Transistor, 变晶格异质结双极晶体管)	100	3 超高密度光存储材料	144
2.4 InAs HBT	102	3.1 光学全息存储材料	144
2.5 SiGe HBT	102	3.2 近场光存储材料	145
2.6 GaN-Based HBT	104	3.3 电子俘获光存储材料	145
第 6 章 半导体量子阱激光器	105	3.4 光子选通光存储材料	145
1 量子阱中电子的能量状态和状态密度分布	105	3.5 双光子吸收光存储材料	146
2 量子阱的光学增益	106	3.6 多波长多阶光存储材料	146
3 量子阱激光器的特性	107	4 磁性和磁光存储材料	146
3.1 阈值电流特性	107	4.1 磁性存储材料	146
3.2 光谱线宽特性	107	4.2 磁记录磁头材料	147
3.3 温度特性	107	4.3 磁光盘存储材料	147
3.4 偏振选择特性	107	4.4 光磁混合存储材料	147
3.5 动态特性	108	5 非易失性存储材料	148
4 应变量子阱激光器	108	第 2 章 可录光盘存储材料	149
4.1 晶格失配与应变	108	1 CD-R 光盘存储材料	149
4.2 应变量子阱能带结构	109	1.1 CD-R 光盘存储材料概述	150
4.3 应变量子阱增益	110	1.2 CD-R 光盘存储材料的光谱性质	152
4.4 应变量子阱激光器	111	1.3 CD-R 光盘存储材料的光学常数	154
5 量子阱激光器的制备技术	112	1.4 CD-R 光盘存储材料的热学性质	154
5.1 MOCVD	112	1.5 CD-R 光盘的记录性能测试主要参数	155
5.2 MBE	112	2 DVD-R 光盘存储材料	157
6 半导体量子阱激光器的应用	113	2.1 DVD-R 光盘存储材料概述	158
6.1 光纤通信	113	2.2 DVD-R 光盘存储材料的光谱性质	159
6.2 光存储	113	2.3 DVD-R 光盘存储材料的光学常数	159
6.3 激光二极管泵浦固体激光器 (DPSS)	114	2.4 DVD-R 光盘存储材料的热学性质	160
6.4 气体探测	114	2.5 DVD-R 光盘的记录性能测试主要参数	160
6.5 低维量子限制激光器	115	2.6 可录光盘存储数据寿命预测	161
第 7 章 新型半导体量子器件	116	3 蓝光可录光盘存储材料	162
1 量子阱红外探测器	116	3.1 无机蓝光可录光存储材料	162
1.1 工作原理	116	3.2 有机蓝光可录光存储材料	164
1.2 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器性能	117	第 3 章 相变光存储材料	168
1.3 热电子晶体管探测器	118	1 相变光存储原理	168
1.4 多色量子阱红外探测器	118	2 相变光存储材料的重要性质	169
1.5 量子点红外探测器	119	2.1 对激光的响应	169
1.6 焦平面阵列 (FPA)	120	2.2 反射率对比度	169
1.7 FPA 应用	120	2.3 擦除速度和稳定性	170
2 量子级联激光器	122	2.4 写/擦循环性能	171
2.1 量子级联激光器的工作原理	123	3 重要的相变光存储材料体系	172
2.2 量子级联激光器的结构与特性	126	3.1 Ge-Sb-Te 三元化合物	172
2.3 量子级联激光器的应用	127	3.2 In-Ag-Sb-Te 四元合金	173
2.4 量子级联激光器研究的新进展	128	3.3 其他相变光存储材料	174
3 垂直腔面发射激光器	129	4 相变光存储材料的掺杂改性	175
3.1 VCSEL 结构	130	4.1 掺杂金属元素	175
3.2 VCSEL 基本特性	131	4.2 掺杂气体元素	177
3.3 各类 VCSEL	133	5 超高密度相变光存储	177
4 量子点激光器	134	5.1 近场光存储	177
4.1 量子点激光器的特性	134	5.2 超分辨技术	178
4.2 量子点激光器的结构	135	5.3 超分辨近场结构	178
4.3 量子点激光材料的外延生长	135	第 4 章 光学全息存储材料	180
4.4 GaAs 基长波长量子点激光器	135	1 光学全息存储的基本原理	180
		1.1 基本原理	180

1.2 全息存储的特点	180	4.2 多进制存储	211
1.3 全息存储的分类	180	4.3 破坏性读出	211
1.4 全息存储记录材料的性能表征	181	4.4 存储信息的稳定性	211
1.5 全息存储对记录材料的要求	181	4.5 数据传输速率	211
2 卤化银乳胶全息记录材料	181	4.6 应用	212
2.1 卤化银乳胶全息记录材料的构成和 光化学反应原理	181	第7章 光子选通光存储材料	213
2.2 卤化银全息记录材料的显影	181	1 无机材料	213
2.3 定影过程	181	1.1 Sm^{2+} 掺杂 PGSHB 无机材料体系	213
2.4 漂白过程	182	1.2 Eu^{2+} 掺杂玻璃体系	215
3 重铬酸盐明胶 (DCG)	182	2 有机材料	215
3.1 重铬酸盐明胶的光化学反应原理	182	2.1 卟啉类化合物	215
3.2 处理方法	182	2.2 有机聚合物	217
3.3 性能特点及其应用	182	第8章 双光子吸收光存储材料	218
4 光致聚合物	182	1 双光子激发光致变色材料	218
4.1 光致聚合物全息存储的机理	183	2 双光子激发光致聚合材料	219
4.2 光致聚合物的构成	183	3 双光子激发光致氧化材料	219
4.3 光聚合物的高密度全息记录特性	183	4 双光子激发光致荧光漂白材料	220
4.4 光致聚合物的高密度全息存储特性	185	5 双光子激发光折变材料	221
5 光折变晶体	185	第9章 多波长多阶光存储材料	222
5.1 光折变晶体产生光折变效应的原理	186	1 二芳基乙烯光致变色材料	223
5.2 光折变全息图的挥发和固定	186	2 螺吡喃光致变色材料	225
5.3 光折变晶体的分类	186	3 胆甾醇型液晶材料	225
5.4 铌酸锂晶体的生长与性能	187	4 其他材料	225
6 光折变聚合物	187	第10章 磁性存储材料	226
6.1 非线性聚合物为基体的系统	187	1 磁记录过程简介	226
6.2 以惰性聚合物为基体的系统	187	1.1 模拟式磁记录	226
6.3 以电荷传输体聚合物为基体的系统	188	1.2 数字式磁记录	226
6.4 玻璃态和全功能型光折变聚合物材料	188	2 磁记录材料综述	226
6.5 液晶光折变聚合物材料	189	3 水平磁记录磁粉材料	227
7 光致变色材料	189	3.1 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁粉	227
7.1 光致变色材料的光致变色机理	189	3.2 包钴的 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁粉	227
7.2 光致变色材料的全息性能	189	3.3 CoO_2 磁粉	227
8 光导热塑材料	189	3.4 金属磁粉	228
8.1 光导热塑材料的全息记录机理	189	4 水平磁记录连续薄膜及介质	228
8.2 光导热塑材料的成分	189	4.1 高密度化对记录介质的要求	228
8.3 材料的全息性能	189	4.2 高密度水平磁记录连续薄膜介质的制备	228
9 其他存储材料	190	4.3 超高密度水平磁存储薄膜介质	229
9.1 光致抗蚀剂	190	5 垂直磁记录及存储材料	232
9.2 金属薄膜	190	5.1 高密度 (短波长) 记录中出现的问题	232
9.3 磁光薄膜	190	5.2 垂直磁记录介质	232
9.4 硫族化合物玻璃	190	5.3 垂直磁记录用的钕铁氧体涂布介绍	232
第5章 近场光存储材料	192	5.4 垂直磁记录用的 CoCr 合金膜	233
1 近场光存储的实现途径	192	5.5 磁头与介质的磁相互作用	234
2 近场光存储材料	194	5.6 垂直磁记录介质的研究进展	236
2.1 一次写入型近场光存储材料	194	第11章 磁头材料	237
2.2 磁光可擦写型近场光存储材料	197	1 环形磁头的工作原理	238
2.3 相变可擦写型近场光存储材料	199	2 环形磁头的性能指标	238
2.4 光致变色可擦写型近场光存储材料	201	3 对磁芯材料的要求	239
3 超分辨近场结构中的掩膜材料	205	4 薄片合金磁芯磁头	239
第6章 电子俘获光存储材料	208	5 铁氧体材料的制备和性能	240
1 电子俘获光存储原理	208	6 铁氧体磁头的应用	241
2 电子俘获材料的制备	208	7 薄膜磁头	242
3 电子俘获光存储材料的特性	209	8 电镀薄膜磁头材料	243
3.1 光谱特性	209	9 溅射薄膜	243
3.2 写入和读出相对效率与温度的关系	210	10 磁电阻读出头材料	244
3.3 写入和擦除特性	210	11 巨磁电阻效应及其应用	246
4 电子俘获光存储系统	211	12 磁性隧道结	247
4.1 电子俘获光盘驱动器	211	第12章 磁光盘存储材料	249
		1 磁光盘存储技术	249

2 磁光盘存储材料	251	6.1 FED 的结构与工作原理	329
2.1 稀土-过渡族金属非晶态材料	251	6.2 场致发射体的制造工艺	329
2.2 金属合金铁磁性磁光多晶薄膜	252	6.3 FED 用荧光粉	330
2.3 氧化物系列磁光存储薄膜	253	7 X 射线激发的荧光粉	330
2.4 光磁混合记录技术	256	7.1 X 射线增强屏	330
第 13 章 光磁混合存储及其材料	258	7.2 X 射线像增强器用的荧光粉	331
1 热辅助磁记录技术 (HAMR)	258	7.3 X 射线荧光屏用荧光粉	332
2 热辅助磁记录技术的特性	259	8 等离子体显示用荧光粉	332
3 热辅助磁存储介质材料	263	8.1 等离子体显示板 (PDP)	332
4 热辅助磁存储磁头设计	266	8.2 放电气体	333
5 总结和展望	268	8.3 发光机理	333
第 14 章 非易失性存储材料	269	8.4 真空紫外荧光粉和它们的特性	334
1 相变随机存储材料	269	8.5 彩色 PDP 显示的特性	335
1.1 OUM 的研究历程和现状	269	第 2 章 液晶材料和液晶显示技术	336
1.2 OUM 的读写擦原理	270	1 液晶材料和其他辅助材料	336
1.3 相变随机存储材料	271	1.1 液晶的概念及分类	336
1.4 OUM 的发展趋势	272	1.2 液晶的相结构	337
2 磁阻随机存储材料	273	1.3 液晶的热力学性质	337
2.1 MRAM 的读写原理	273	1.4 液晶的化学结构与物理性质	337
2.2 MRAM 的发展概况和现状	274	1.5 显示对液晶材料的性能要求	343
2.3 巨磁阻存储材料	274	1.6 显示用液晶材料	344
2.4 MRAM 的发展趋势	277	1.7 液晶显示用其他原材料	350
3 铁电随机存储材料	278	2 液晶显示的基本原理	359
3.1 FeRAM 的发展概况和现状	278	2.1 扭曲向列液晶显示	359
3.2 FeRAM 的存储原理	278	2.2 超扭曲向列液晶显示	360
3.3 铁电存储材料	279	2.3 有源矩阵液晶显示	362
3.4 FeRAM 集成工艺	279	2.4 宾-主型液晶显示	364
3.5 FeRAM 的可靠性分析	280	2.5 胆甾-向列相变型液晶显示	365
参考文献	281	2.6 铁电液晶显示	366
第 9 篇 显示材料	293	2.7 聚合物分散型液晶显示	367
第 1 章 荧光粉显示技术	295	第 3 章 有机电致发光显示	369
1 荧光粉的发光机理	295	1 有机电致发光显示技术	369
1.1 电子束激励荧光粉发光的物理过程	295	1.1 特点和应用	369
1.2 荧光粉的发光中心	296	1.2 结构和原理	370
2 阴极射线激励发光的主要荧光粉的发光机理 及其光学性质	297	1.3 制备工艺	370
2.1 II b-IV b 族化合物	297	1.4 彩色化技术	371
2.2 发光中心是稀土离子的荧光粉	300	2 有机电致发光显示材料分类	371
3 荧光粉的合成与处理工艺	303	3 小分子有机电致发光材料	372
3.1 合成的通用工艺	303	3.1 空穴传输材料	372
3.2 表面处理	306	3.2 电子传输材料	373
3.3 彩色 CRT 荧光粉的后处理工艺	307	3.3 发光材料	374
3.4 彩色 CRT 用荧光粉的制备工艺	308	3.4 其他小分子材料	377
3.5 荧光粉的涂覆工艺	308	4 聚合物有机电致发光材料	377
4 阴极射线管用荧光粉	311	4.1 聚合物电致发光材料的分类	377
4.1 阴极射线管的结构和原理	311	4.2 PPV 及其衍生物	377
4.2 彩色 CRT	312	4.3 聚苯及其衍生物	378
4.3 示波用 CRT	312	4.4 聚烷基苄 (PAF)	378
4.4 其他类型 CRT	312	4.5 聚噻吩及其衍生物	379
4.5 CRT 对荧光粉的一般要求	313	4.6 聚乙烯咔唑及其他	379
4.6 实用 CRT 荧光粉	314	4.7 聚苯胺阳极和柔性基片	379
4.7 CRT 荧光粉型号的命名体系	321	5 有机电致发光材料性能参数	379
5 真空荧光显示用荧光粉	326	5.1 材料纯度	379
5.1 真空荧光显示器件	326	5.2 发光性能和荧光量子效率	380
5.2 VFD 器件的结构和工作原理	326	5.3 热稳定性	380
5.3 VFD 对荧光粉的要求	326	5.4 能级结构	380
5.4 VFD 器件用荧光粉	327	5.5 成膜性能	380
6 场致发射显示 (FED) 用荧光粉	329	6 有机电致发光器件性能参数	380
		第 4 章 无机电致发光和电子纸显示技术	382
		1 无机电致发光显示技术	382

1.1 无机 EL 的特点	382	3.2 粉末外包层法	445
1.2 粉末型交流电致发光显示器件 (ACPEL)	382	3.3 等离子体外包层法	446
1.3 薄膜型交流电致发光显示器件 (ACTFEL)	383	4 溶胶-凝胶预制棒工艺及设备	447
1.4 无机 EL 材料	383	4.1 溶胶-凝胶工艺原理	447
1.5 新型无机 EL 技术	384	4.2 溶胶-凝胶工艺在光纤制造中的应用	449
2 电子纸显示技术	384	第 5 章 光纤拉制工艺与设备	452
2.1 器件结构及工作原理	385	1 光纤成形机理及拉制工艺	452
2.2 电泳显示材料	386	1.1 玻璃的特性	452
参考文献	388	1.2 玻璃的转变	452
第 10 篇 通信光纤材料及其工艺	390	1.3 光纤的成形机理	452
第 1 章 概述	391	1.4 光纤拉制工艺过程	452
1 通信光纤的发展历史和应用现状	391	2 光纤拉制过程对光纤性能的影响	453
2 光纤导光和光纤通信的原理	391	2.1 光纤成形阶段对性能的影响	453
3 光纤的制造	392	2.2 涂覆阶段对性能的影响	453
4 光纤的损失	393	3 拉制工艺对设备的要求	454
5 光纤的接续和光缆	393	3.1 拉丝设备组成及其功能	454
第 2 章 通信光纤的传输理论和设计	395	3.2 高温炉	455
1 多模光纤的传输理论	395	3.3 涂覆系统	456
2 单模光纤的传输理论	395	3.4 牵引、卷绕装置	456
2.1 单模传输的条件	395	3.5 强度筛选机	457
2.2 偏振的概念	396	3.6 套管拉丝技术	457
2.3 单模光纤的色散	397	第 6 章 套塑成缆工艺及其设备	458
2.4 色散位移光纤	398	1 光纤套塑工艺及其设备	458
3 常规单模光纤的设计	398	1.1 光纤松套工艺及其设备	458
4 色散位移单模光纤的设计	399	1.2 紧套工艺	461
5 色散补偿光纤的设计	405	2 光缆成缆工艺	462
6 其他一些特种光纤的设计	406	2.1 光缆的绞合工艺	462
6.1 抗弯光纤	406	2.2 光缆的护套工艺	464
6.2 特种截止光纤	406	第 7 章 光纤的特性、标准及其测试方法	467
7 多模光纤的设计	407	1 光纤的特性	467
第 3 章 光纤原材料	409	1.1 多模光纤的特性	467
1 光纤材料概述	409	1.2 单模光纤的特性	467
2 光纤材料对光纤特性的影响	409	2 有关光纤和光缆的国际、国内标准	470
2.1 材料对光纤衰减的影响	409	2.1 ITU-T 的建议	470
2.2 材料和传输带宽的关系	410	2.2 IEC 有关光纤和光缆的国际标准	471
3 石英玻璃光纤所用原材料	411	2.3 中华人民共和国国家标准	471
3.1 主要原材料及其物化性能	411	2.4 国内通信行业标准	472
3.2 对光纤原材料纯度的要求	411	2.5 国际、国内标准中光纤类别对照	472
3.3 石英光纤制造中采用的新原材料	415	2.6 单模光纤参数的标准值 (或建议值)	472
4 石英玻璃光纤材料的制备工艺和提纯技术	415	2.7 多模光纤参数的标准值 (或建议值)	475
4.1 高纯试剂制备和提纯技术简介	415	3 特性参数的测量方法	475
4.2 光纤用主要原材料提纯工艺	416	3.1 单模光纤的测量方法	476
4.3 光纤用气体原料的纯化	418	3.2 多模光纤的测量方法	483
5 石英玻璃光纤原材料的纯度检测	419	第 8 章 光纤的接续	484
5.1 金属杂质离子的检测	419	1 概述	484
5.2 含氢化合物的检测	419	2 光纤接续的损耗	484
5.3 高纯气体的纯度检测方法	420	2.1 单模光纤连接损耗分析	484
5.4 高纯气体纯度测试仪表	420	2.2 多模光纤连接损耗分析	485
6 高纯气体的储藏、输送	421	3 光纤的永久连接	485
第 4 章 预制棒的各种制作工艺及其设备	422	3.1 光纤端面的制备	486
1 概述	422	3.2 光纤的熔接	486
2 芯棒工艺及设备	422	3.3 光纤的机械连接	487
2.1 MCVD 工艺及设备	422	4 光纤的活动连接	489
2.2 OVD 工艺及设备	426	4.1 光纤活动连接器基本原理和结构	489
2.3 VAD 工艺及设备	430	4.2 几种基本光纤活动连接器简介	489
2.4 PCVD 工艺及设备	434	5 总结与展望	491
3 外包层工艺及其设备	442	第 9 章 特种光纤	492
3.1 套管法	442	1 色散补偿光纤	492
		2 保偏光纤	492

3 掺稀土离子光纤	493	2.3 大功率半导体激光器的纵向结构设计	555
3.1 掺铟光纤	493	2.4 大功率半导体激光器的散热结构	556
3.2 掺镱光纤	493	3 大功率半导体激光器的材料生长及器件制作	557
3.3 掺铈光纤	494	3.1 大功率半导体激光器的材料及其特性	557
4 光子晶体光纤	494	3.2 大功率半导体激光器的材料生长	557
4.1 光子晶体	494	3.3 大功率半导体激光器的器件制作	562
4.2 光子晶体光纤	494	第5章 非线性光学晶体及其制备	565
5 其他特种光纤	495	1 低温相偏硼酸锂	565
第10章 展望——通信光纤的技术发展动向及 应用前景	496	1.1 Nd:YAG 激光倍频	566
1 通信光纤的技术发展动向	496	1.2 超快脉冲激光倍频	566
2 应用前景	497	1.3 钛宝石激光和 Alexandrite 激光倍频	566
参考文献	499	1.4 在 OPO 和 OPA 中的应用	566
第11篇 全固态激光器及相关材料	501	1.5 在电光调制中的应用	567
第1章 概述	502	2 三硼酸锂	567
第2章 激光光纤的材料及其制备	508	3 氟代硼铍酸钾	568
1 光纤的分类	508	4 三硼酸铯	570
2 光纤材料要求	509	5 硼酸铍锂	571
3 多组分光学玻璃光纤及其制备方法	509	6 磷酸氧铈钾	574
3.1 氟化物玻璃光纤	509	7 准相位匹配技术和周期极化铌酸锂晶体	576
3.2 硫属化合物玻璃光纤	510	7.1 准相位匹配原理	576
4 低水峰石英光纤	510	7.2 铌酸锂极化过程	578
4.1 掺杂、纤芯和包层	511	7.3 主要应用情况	579
4.2 低水峰石英光纤预制棒制造	511	8 铌酸钾	579
4.3 光纤拉制	514	9 非线性光学晶体的制备	583
5 用于放大器和激光器的掺杂光纤	515	参考文献	587
5.1 玻璃基质中的稀土离子	515	第12篇 稀土磁性材料与自旋电子材料	589
5.2 掺杂光纤的制造与特性测量	521	第1章 稀土永磁材料	591
5.3 掺杂光纤的特性参数	525	1 概述	591
6 塑料光纤	526	1.1 永磁材料的磁参量	591
6.1 塑料光纤的优点	526	1.2 稀土永磁材料的发展概况	595
6.2 塑料光纤设计及制备	526	1.3 稀土永磁材料的种类及特点	596
6.3 塑料光纤制备的关键技术	527	1.4 稀土永磁材料的功能特性及其与高新 技术的关系	597
6.4 发展展望	527	1.5 稀土永磁合金的晶体结构和内禀磁性能	597
7 光子晶体光纤	528	2 烧结稀土永磁材料	599
7.1 光子晶体光纤的制备	528	2.1 1:5 型稀土钴永磁材料	600
7.2 光子晶体光纤的导光机理	528	2.2 2:17 型稀土钴永磁材料	606
7.3 光子晶体光纤的特性及应用	528	2.3 Nd-Fe-B 系永磁材料	614
7.4 光子晶体光纤的研究方法	531	3 黏结稀土永磁材料	630
第3章 激光晶体材料及其制备	532	3.1 黏结稀土永磁材料的特点	630
1 红宝石	532	3.2 黏结稀土永磁材料的种类及制备工艺	630
2 Nd:YAG	533	3.3 磁粉的主要制备方法	631
3 Yb ³⁺ :YAG	535	3.4 商用黏结稀土永磁材料	635
4 Nd ³⁺ :YVO ₄ 激光晶体	537	3.5 新型黏结稀土铁系永磁材料	637
5 Nd:GGG 激光晶体	538	第2章 磁制冷与磁蓄冷材料	644
6 Nd:YLF	540	1 磁卡效应热力学基础	646
7 掺钛蓝宝石 (Ti ³⁺ :Al ₂ O ₃) 激光晶体	541	2 顺磁盐	647
8 紫翠绿宝石 (BeAl ₂ O ₄ :Cr ³⁺)	543	3 稀土金属与合金	648
9 激光自倍频晶体	544	3.1 稀土金属	648
10 激光晶体的制备	546	3.2 稀土合金	650
第4章 大功率半导体激光器的发展与应用	549	4 含稀土金属间化合物	652
1 半导体激光器的发展与应用	549	4.1 稀土-Al 合金	652
1.1 大功率半导体激光器单管的发展	549	4.2 稀土-Ni 合金	653
1.2 大功率半导体激光器列阵的发展	550	4.3 稀土-Fe 合金	654
1.3 大功率半导体激光器的应用	551	4.4 稀土-Co 合金	654
2 大功率半导体激光器器件结构	552	5 稀土与非磁性元素合金	655
2.1 大功率半导体激光器外延结构的设计	552	5.1 Gd ₅ (Si _x Ge _{1-x}) 合金	655
2.2 大功率半导体激光器的横向结构设计	554	5.2 Gd _x R _{5-x} Si ₄ 合金	656

5.3 LaFe _{11.2} CO _{0.7} Si _{1.1} 合金	658	10 稀土巨磁致伸缩材料 Tb-Dy-Fe 的热处理	682
6 稀土氧化物	658	10.1 一般热处理	682
6.1 石榴石	658	10.2 热处理前后材料的显微组织结构的变化	682
6.2 钙钛矿结构	658	10.3 磁场热处理	683
7 非稀土磁制冷材料	659	11 Tb-Dy-Fe 的畴结构与磁化过程	686
8 小制冷机磁蓄冷器	660	11.1 Tb-Dy-Fe 的畴结构	686
9 磁性蓄冷材料	660	11.2 磁化过程与磁致伸缩应变	686
第3章 稀土巨磁致伸缩材料	662	12 预压应力与磁致伸缩材料的性能	687
1 磁致伸缩现象与磁致伸缩材料	662	12.1 预压应力的大小对 $\lambda \sim H$ 曲线的影响	687
1.1 磁致伸缩	662	12.2 预压应力的大小对 k_{33} 曲线的影响	688
1.2 磁致伸缩应变的描述	662	12.3 三种轴向取向样品形成 90° 畴结构所需的 预压应力	688
1.3 磁弹性能	663	13 其他巨磁致伸缩材料	698
1.4 磁致伸缩的逆效应	663	14 Tb-Dy-Fe 材料的稳定性	698
1.5 磁致伸缩材料	663	14.1 化学稳定性	698
2 巨磁致伸缩材料的功能特性及其与 高新技术的关系	663	14.2 环境稳定性	698
2.1 磁致伸缩材料的功能特性	663	15 Tb-Dy-Fe 材料的性能测量	690
2.2 巨磁致伸缩材料与高新技术的关系	663	15.1 λ 的测量	690
3 磁致伸缩材料应用原理及其应用对材料 性能的要求	664	15.2 k_{33} 的测量	691
3.1 磁致伸缩材料的应用原理	664	15.3 弹性模量 E 与声速 v 的测量	691
3.2 磁致伸缩驱动棒的能量转换原理和 磁机械耦合系数 k_{33}	664	15.4 磁导率 μ 的测量	691
3.3 使用对磁致伸缩材料性能的要求	665	16 巨磁致伸缩材料的应用	691
4 磁致伸缩材料的发展及分类	666	16.1 巨磁致伸缩材料的应用范围	692
4.1 磁致伸缩材料的发展	666	16.2 巨磁致伸缩材料的应用设计	692
4.2 磁致伸缩材料的分类	667	第4章 磁光存储材料	695
5 RFe ₂ 系材料的相图, 稀土铁化合物的结构与内 禀磁特性	667	1 磁光存储技术的发展进程	695
5.1 Tb-Fe、Dy-Fe、Sm-Fe 二元系相图	667	2 磁光存储的物理基础和对材料性能的要求	697
5.2 Tb-Dy 的二元相图	668	2.1 磁光存储原理	697
5.3 R-Fe 二元化合物的晶体结构和磁致伸缩	668	2.2 磁光记录读出原理	697
6 (Tb, Dy) Fe ₂ 合金系磁晶各向异性的相互补偿 ..	671	2.3 对磁光存储材料的基本要求	697
7 Tb _x Dy _{1-x} Fe ₂ 稀土巨磁致伸缩材料的制备与 晶体生长原理	672	3 磁光存储材料	697
7.1 熔体定向凝固制造单晶或取向多晶 材料的技术	672	3.1 稀土-过渡族金属非晶态材料	698
7.2 熔体定向凝固制备轴向取向柱 晶材料的原理	674	3.2 金属合金铁磁性磁光多晶薄膜	700
7.3 Tb-Dy-Fe 区熔定向凝固时轴向 择优生长方向	675	3.3 氧化物系列磁光存储薄膜	701
8 Tb-Dy-Fe 合金的晶体定向凝固晶体轴向取向与商品 巨磁致伸缩材料	676	4 光磁混合记录技术	704
8.1 Tb-Dy-Fe 合金晶体磁致伸缩应变的各向 异性	676	4.1 研究光磁混合记录的背景	704
8.2 非取向多晶与取向多晶体的磁致伸缩应变 ..	676	4.2 光磁混合记录的记录和读出原理	704
8.3 Tb-Dy-Fe 合金的 [112] 轴向取向的磁致伸缩 应变 λ_{112}	677	4.3 光磁混合记录材料	704
8.4 Tb-Dy-Fe 合金的 [110] 轴向取向的磁致伸缩 应变 λ_{110}	677	第5章 巨磁电阻材料	706
8.5 商品稀土巨磁致伸缩材料及其特性	678	1 磁性多层膜的巨磁电阻效应	706
9 稀土巨磁致伸缩材料 (Tb, Dy) Fe ₂ 的显微 结构	679	1.1 巨磁电阻效应的简单图像——双电流模型 ..	706
9.1 Tb-Dy-Fe 三元合金的相图和相组成	679	1.2 巨磁电阻效应物理学	707
9.2 Tb _{0.27-0.35} Dy _{0.73-0.65} Fe _{1.95} 合金铸态的 显微组织	680	2 隧穿巨磁电阻效应	710
9.3 重稀土元素 Tb 和 Dy 在组成相中的分布	680	3 材料和应用	711
9.4 Tb-Dy-Fe 磁致伸缩材料的晶体缺陷	681	4 磁性颗粒膜的巨磁电阻效应	713
		4.1 自旋相关散射	713
		第6章 庞磁电阻材料	715
		1 钙钛矿锰氧化物的庞磁电阻效应	715
		1.1 晶体结构和磁结构	715
		1.2 磁性相图	717
		1.3 理论概述	718
		1.4 输运性质和磁电阻效应	719
		1.5 非本征磁输运现象	721
		1.6 相分离	722
		2 Fe ₃ O ₄ 的庞磁电阻效应	724
		第7章 稀释磁性半导体材料	726
		1 稀释磁性半导体的磁性	726
		2 自旋的注入	728
		2.1 创造自旋极化载流子-光学激发	729

2.2 注入自旋	729	4.2 基于稀磁半导体材料的自旋功能器件	731
2.3 自旋极化的探测	730	5 高居里温度稀磁半导体材料	732
2.4 自旋弛豫	730	5.1 (Ga, Mn) P	732
3 自旋的输运	730	5.2 (Ga, Mn) N	733
4 稀磁半导体材料的性能和应用	731	5.3 (Zn, Mn) O	733
4.1 稀磁半导体材料的性能	731	参考文献	734

第 7 篇

半导体低维结构和量子器件

■ 主 编	陈涌海	叶小玲	王占国
■ 编 写	王占国	叶小玲	陆大成
	段树坤	钱家骏	陈涌海
	刘训春	魏 珂	张 靖
	王 圻	刘峰奇	

第1章 概述

半导体低维结构材料是一种人工晶体材料，通常由多层相同和不同半导体材料组成，作为纳米科学技术中重要组成部分，是研究 1 ~ 100 nm 空间尺度内电子运动和变化规律，以及在该特征尺度水平上对其加工制造和光电性能剪裁具有全新功能物质的科学技术。所谓“全新功能”指的是块体材料所不具备的功能，本书则主要指基于量子特性的功能。半导体低维结构材料及其器件应用是半导体纳米科学技术中的重要组成部分，其量子特性来自纳米尺寸空间里电子受到的量子尺寸约束作用。

1 半导体低维结构的定义

维是几何学及空间理论的一个基本概念，构成空间的每一个因素（如长、宽和高）叫做一维，普通的空间是三维的，理想的平面是二维的，直线是一维的，而理想的点则是零维的。纳米半导体材料，也称之为半导体低维结构材料或量子工程材料，通常是指除三维块体材料外的二维（2D）半导体超晶格、量子阱材料，一维（1D）半导体量子线和零维（0D）半导体量子点材料。在超晶格、量子阱材料中，载流子仅在与生长平面垂直的方向上的运动受到约束，而在其他两个生长平面内的方向的运动则是自由的；所谓约束是指材料在这个方向上的特征尺寸与电子的德布罗意波长（ $\lambda_d = h/\sqrt{2m^*E}$ ，其中 h 是普朗克常数， m^* 是电子的有效质量；GaAs 导带边附近的电子能量约为 0.1 eV 时，对应的电子德布罗意波长 λ_d 约为 20 nm）或电子的平均自由程（ $L_{2DEG} = \frac{h\mu}{q}\sqrt{2\pi n_s}$ ，其中 L_{2DEG} 和 μ 分别是二维电子气（2DEG）中电子的平均自由程和电子迁移率， n_s 是 2DEG 的面密度， q 是电子电荷）相比拟或更小时，电子沿这个空间方向不能自由运动，即它在这个方向运动的能量是量子化的。一维量子线材料，是指载流子仅在一个方向可以自由运动，而在另外两个方向的运动受到约束；零维量子点材料，是指载流子在三个方向上运动都要受到约束的材料体系，载流子在三个维度上运动的能量都是量子化的。不同维度的半导体材料及其相应的电子态密度函数分别如图 7.1-1 和 2.3.3 节中的图 7.2-27 所示。

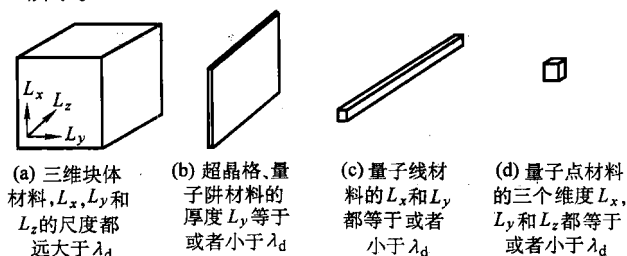


图 7.1-1 不同维度的半导体材料及其相应的电子态密度函数

下面我们将会看到，正是由于纳米材料所特有的电子态密度函数分布，才使它们具有块体材料所没有的许多优异性能，成为新型量子器件研制的理论基础。

2 半导体低维结构材料的基本特性

半导体低维结构材料是一种人工可改性的（通过能带工程实施）新型半导体材料，具有与三维块体材料截然不同的优异性能。随着材料维度的降低和材料结构特征尺寸的减小（ ≤ 50 nm），量子尺寸效应，量子隧穿效应，库仑阻塞效应，

量子干涉效应，多体相关和非线性光学效应以及表面、界面效应等都会表现得越来越明显，这将从更深的层次揭示出半导体低维结构材料所特有的新现象、新效应，构成了新一代量子器件的基础。如基于量子效应的微/纳电子器件和光电子器件分别以其固有的超高速、超高频、超高集成度、高效、低功耗和极低阈值电流密度、极高量子效率、极高调制速度、极窄线宽和高的特征温度以及微微焦耳平均功耗等特点，在未来纳米电子学、光子学和光电集成等方面有着极其重要的应用前景，极有可能触发新的技术革命，受到世界各国政府、科学家和有眼光的企业家的重视。

从 20 世纪 70 年代以来，以分子束外延（MBE）、金属有机物化学气相淀积（MOCVD）等为代表的先进薄层材料生长技术，超精细原子加工和电子束光刻技术等不断发展和完善与进步，以及随后发展起来的应变自组装半导体量子点、量子线生长技术等，为半导体低维结构材料的生长、制备和量子器件的研制创造了条件。目前，超晶格、量子阱材料的工业生产制备技术已很成熟，基于它的量子器件如高电子迁移率晶体管（HEMT）、双异质结晶体管（HBT）和量子阱激光器（QWLD）等在光纤通信和移动通信领域得到了广泛的应用，并已形成了高技术产业。随着应变自组织外延生长技术的发展和成熟，已经很容易获得大量高性能应变自组织量子点和量子线结构材料。目前长波长（1.3 μm ）量子点激光器在阈值电流密度和特征温度等性能方面已经展现出了比传统 InP 基长波长量子阱激光器更为优异的指标，量子点红外探测器的研制也取得了突破性进展，展示了良好的应用前景。下面将对半导体低维结构材料所特有的量子效应作扼要的介绍。

2.1 量子尺寸（约束）效应

1970 年江琦和朱兆祥在寻找负微分电阻新器件时，提出了超晶格的概念。他们设想，如果把两种晶格匹配很好、但禁带宽度不同的半导体材料（如 GaAlAs 和 GaAs 等）交替生长成周期结构，则会在生长轴方向产生一个附加周期，由于这个周期比天然材料的晶格常数大许多倍，故称为超晶格。1971 年，卓以和首先利用分子束外延（MBE）技术，生长出 GaAlAs/GaAs 这种周期结构。超晶格概念的提出和超晶格结构材料的生长实现，不仅推动了半导体物理和材料科学的发展，而且以全新的概念改变着光电器件的设计思想，使半导体器件的设计与制造从过去的所谓“杂质工程”发展到“能带工程”，为研制光电性质“可剪裁”的新型量子器件打下了基础。图 7.1-2 是 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 超晶格、量子阱结构导带边和价带边能带示意图。GaAlAs 势垒层和 GaAs 势阱层的禁带宽度和层厚分别用 E_g 、 E_g 和 L_b 、 L_w 表

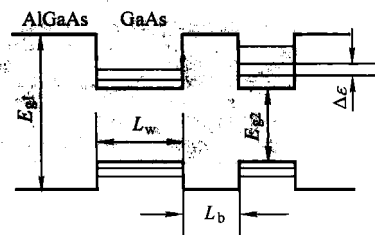


图 7.1-2 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 超晶格、量子阱结构导带和价带边能带示意图

示。若 L_0 足够厚，处于相邻阱中的电子和空穴的波函数之间无重叠，即两者之间没有相互作用，仍保持其各自的分离能值，称这种量子结构为量子阱。相反，若势垒层 L_0 很薄，相邻阱中电子和空穴的束缚能级相互耦合形成微带，则称之为超晶格结构。

我们知道，当量子阱的宽度 L_w 等于或小于电子的德布洛意波长 λ_d 时（对硅和 GaAs 等半导体材料， λ_d 分别在几纳米到几十纳米之间），处于量子阱中的电子沿量子阱生长方向的运动受到限制而不能自由运动，这时，电子的能态由块体材料的连续分布变为一系列的离散量子能级（见图 7.1-2 中的虚线所示）。按量子力学计算，量子能级间的能量差 $\Delta\epsilon$ 与量子阱的宽度 L_w 的平方成反比。 L_w 越小， $\Delta\epsilon$ 越大，即电子受约束的程度越强。通称纳米半导体材料中电子运动因受约束而出现的量子能级分裂、带隙增大等效应为量子尺寸（约束）效应。量子尺寸效应会导致材料的光、电、磁学等性质的显著改变。比三维块体材料大得多的低维量子束缚能和振子强度、量子约束斯塔克效应等为新一代量子器件（如半导体量子阱、量子点激光器，半导体光双稳器件和光调制器等）的研制打下了理论基础。

2.2 量子隧穿效应

假定具有一定能量的粒子由势垒的左方向右方运动。在经典力学中，只有能量大于势垒的粒子才能越过势垒运动到势垒的右方，而小于势垒能量的粒子则被反射回去，不能透过势垒。在量子力学中，情况则不同，考虑到粒子具有的波动性，不仅能量大于势垒的粒子可越过势垒，而且能量小于势垒的粒子也有一定的概率穿透势垒运动到势垒的右边。称能量小于势垒高度的粒子仍能穿透势垒的现象为量子隧穿效应（见图 7.1-3）。量子隧穿的概率与势垒的高度、厚度和粒子的有效质量有关；在共振隧穿中，还与势阱的宽度、材料的能带结构有关。共振量子隧穿现象的实验证明是在超晶格、量子阱材料研制成功后的 1974 年，由张立纲等在 GaAlAs/

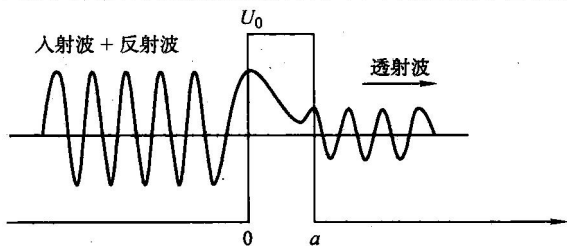


图 7.1-3 量子隧穿效应示意图

GaAs 双势垒结构中首先观察到的。基于量子隧穿效应的共振隧穿二极管、三极管及其集成在超高频振荡器和高速电路等方面有着重要的应用前景。

2.3 库仑阻塞效应

如果一个量子点与其所有相关电极的电容之和足够小（如小于 10^{-18}F ），这时只要有一个电子进入这个量子点，引起系统增加的静电能就会远大于电子热运动能量 $K_B T$ ，这个静电能将阻止随后第二个电子进入同一个量子点，这种现象叫做库仑阻塞（Coulomb blockade）效应。在实验上，可以利用电容耦合，通过外加栅压来控制双隧道结连接的量子点体系的单个电子的进出。如果施加在双势垒结两端的电压小于某一个阈值电压，栅电压为零时，电子输运被禁止，处于库仑阻塞状态；当增加栅压直到一个电子可以隧穿到量子点上时，即电源所做的功足以抵偿电子隧穿到量子点时导致的静电能增加，库仑阻塞不起作用，有电流流过器件；继续增加栅压，另一个电子隧穿进入量子点，静电能的增加，器件再次处于库仑阻塞状态，无电流流过。如此反复，库仑阻塞随由 e/C_g （ e 为电子电荷， C_g 为栅电容）决定的栅压间隔周期而改变。可以期望，双结的电导则随以 e/C_g 为间隔的栅压增加而振荡，称为库仑阻塞振荡（如图 7.1-4 所示）。在一定的栅压下，提高源漏电压，使量子点上对应的能态数增加，通过量子点的电子数目随之增加，源漏电流随源漏电压阶梯上升，即通常所说的库仑台阶（如图 7.1-5 所示）。基于库仑阻塞效应可以制造多种量子器件，如单电子器件和量子点旋转门等。单电子器件不仅在超大规模集成电路制造上有着重要的应用前景，而且还可用于研制超快、超高灵敏静电计，其分辨率可以高达 $1.2 \times 10^{-5} e/H_e^{1/2}$ ，可用来检测小于万分之一的电子电荷的电量。

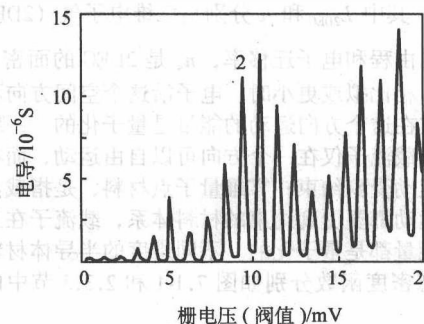


图 7.1-4 单电子晶体管 (SET) 的电导随栅压振荡示意图

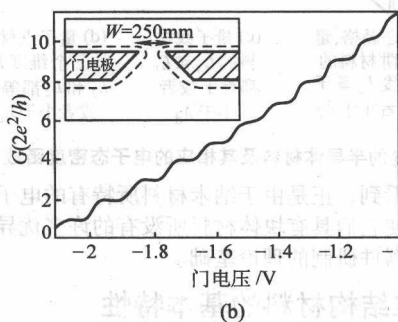
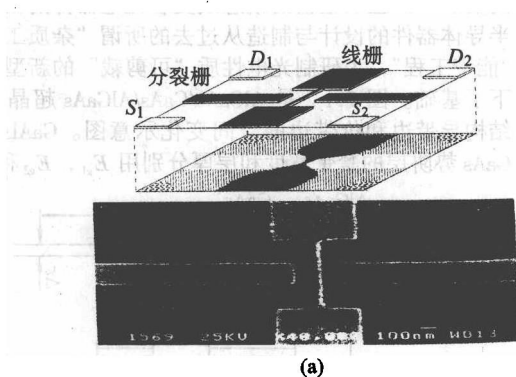


图 7.1-5 带有分裂栅的器件结构，栅长和栅宽都比电子的平均自由程小 (a)，低温下测得的电导随门电压台阶式的变化曲线，台阶高度为 $2e^2/h$ (b)
(由于被电子占据的子带 N 是整数，且随通道的宽窄而变化，故电导随电压成台阶式变化)