



普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

现代电子材料与元器件

王 巍 冯世娟 罗 元 编著



科学出版社



普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

现代电子材料与元器件

王 巍 冯世娟 罗 元 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了主要的电子信息功能材料的结构和组成、电子元器件的工作原理,以及这些器件在电子信息系统中的应用。全书共10章,分别是:绪论;晶体材料的结构;半导体材料与应用;化合物半导体基础;化合物半导体器件;光电子材料与器件;电介质材料;磁电子学材料与器件;电子陶瓷材料;纳米技术与纳米电子学。书中主要介绍电子元件常用材料的基础理论、基本参数与性能特点,器件的工作原理、基本组成、制作及应用情况。

本书可作为高等工科院校微电子学、电子科学与技术、电子信息科学与技术、光信息科学与技术专业的本科生教材,也可作为自动控制类、计算机类、通信类及相关材料类专业高年级本科生和研究生的教材及教学参考书,还可供从事电子材料与元件的生产、科研及产品研发的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子材料与元器件/王巍,冯世娟,罗元编著. —北京:科学出版社, 2012

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

ISBN 978-7-03-033020-8

I. ①现… II. ①王… ②冯… ③罗… III. ①电子材料-高等学校-教材
②电子元件-高等学校-教材 ③电子器件-高等学校-教材 IV. ①TN04 ②
TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 261258 号

责任编辑:刘鹏飞 匡 敏 / 责任校对:刘小梅

责任印制:张克忠 / 封面设计:迷底书装

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2012年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年3月第一次印刷 印张:21

字数:540 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》

编委会

顾问

姚建铨 中国科学院院士 天津大学
蔡惟铮 国家级教学名师 哈尔滨工业大学

主任

吕志伟 教授 哈尔滨工业大学

副主任

金亚秋 教授 复旦大学
郝跃 教授 西安电子科技大学
严晓浪 教授 浙江大学
胡华强 编审 科学出版社

委员(按姓氏笔画排序)

王卫东	教授	中国科学技术大学	张兴	教授	北京大学
王志华	教授	清华大学	张怀武	教授	电子科技大学
毛军发	教授	上海交通大学	张贵忠	教授	天津大学
文玉梅	教授	重庆大学	张雪英	教授	太原理工大学
匡敏	副编审	科学出版社	陈弟虎	教授	中山大学
仲顺安	教授	北京理工大学	陈徐宗	教授	北京大学
任晓敏	教授	北京邮电大学	陈鹤鸣	教授	南京邮电大学
刘纯亮	教授	西安交通大学	欧阳征标	教授	深圳大学
杨冬晓	教授	浙江大学	都思丹	教授	南京大学
杨瑞霞	教授	河北工业大学	高勇	教授	西安理工大学
时龙兴	教授	东南大学	郭树旭	教授	吉林大学
何伟明	教授	哈尔滨工业大学	黄卡玛	教授	四川大学
余江	教授	云南大学	崔一平	教授	东南大学
邸旭	教授	长春理工大学	逯贵祯	教授	中国传媒大学
邹雪城	教授	华中科技大学	曾云	教授	湖南大学
应质峰	教授	复旦大学	谢泉	教授	贵州大学
宋梅	教授	北京邮电大学	蔡敏	教授	华南理工大学

丛 书 序

材料、能源和信息是 21 世纪的三大支柱产业,电子科学与技术是电子工程和电子信息技术发展的基础学科。目前,许多发达国家,如美国、德国、日本、英国、法国等,都竞相将电子科学与技术相关领域纳入了国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术等方向的研究也给予了高度重视,在多项国家级战略性科技计划中,如“863 计划”、“973 计划”、国家科技攻关计划、国家重大科技专项等,都有大量立项。在近几年发布的国务院《2006—2020 年国家信息化发展战略》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,对我国的集成电路(特别是中央处理器芯片)、新一代信息功能材料及器件、高清晰度大屏幕平板显示、激光技术等关键领域都提出了明确目标。

电子科学与技术主要研究制造电子、光电子的各种材料及元器件,以及集成电路、集成电子系统和光电子系统,并研究开发相应的设计和制造技术。它涵盖的学科范围很广,是多学科交叉的综合性学科。现在,教育部本科专业目录中,电子科学与技术专业涵盖了微电子技术、光电子技术、物理电子技术、电子材料与元器件及电磁场与微波等专业方向。随着学科的交叉发展和产业的整合,各专业方向已彼此渗透交融。如何拓宽专业方向如何体现专业特色是当前我国高校电子科学与技术专业在办学方面所迫切需要探讨的问题。教育部电子科学与技术专业教学指导分委员会起草的《普通高等学校电子科学与技术本科指导性专业规范》,对本专业的核心知识领域和知识单元的覆盖范围作了规定,旨在引导高等学校电子科学与技术专业在办学方向与人才培养方面探索新的模式,不断提高教学质量,增强高校教学的创新能力,更好地培养知识、能力、素质全面协调发展的,适合我国电子科学与技术各领域不同层次发展需求的有用人才。

教育部为了推进“质量工程”,自 2007 年 10 月开始,先后三批遴选了国家级特色专业建设点。目前,有三十余个院系被批准为电子科学与技术国家级特色专业建设点。在教材建设方面,2008 年 10 月,教育部高教司在《关于加强“质量工程”本科特色专业建设的指导性意见》中指示:“教材建设要反映教学内容改革的成果,积极推进教材、教学参考资料和教学课件三位一体的立体化教材建设,选用高质量教材,编写新教材。”为了适应新形势下对电子科学与技术领域人才培养的需求,本届电子科学与技术教学指导分委员会经过广泛深入调研,依托电子科学与技术专业国家级、省级特色专业建设点,与科学出版社共同组织出版本套《普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材》,旨在贯彻专业规范和教学基本要求,总结和推广各特色专业建设点的教学经验和教学成果,以提高我国电子科学与技术专业本科教学的整体水平。

本套丛书在组织编写中,重点考虑了以下几方面的特色:

1. 体现专业特色,贯彻专业规范和教学基本要求。依托“国家级、省级特色专业建设点”,汇总优秀教学成果,将特色专业建设的内容、国内外科研教学的成果、电子科学与技术方向的专业规范与教学基本要求结合起来,教材内容安排围绕专业规范,体现核心知识单元与知识点。

2. 按照分类指导原则,满足多层面的需求。针对同一类课程,根据不同的教学层次(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学)和学时要求(多学时、少学时),涵盖不同范围的拓展知识单元,编写适合不同层次需求的教材。注重与先修课程、后续课程的有机衔接,每本教材在重视系统性和完整性的基础上,尽量减少内容重复。

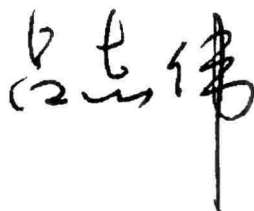
3. 传承精品,吐故纳新。本套丛书吸纳了科学出版社 2004 年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新一版教材更新内容,注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

4. 拓宽专业基础,面向工程应用加强实践环节。适当拓宽专业基础知识的范围,以增强学生的适应性;面向工程应用,突出工科特色,反映新技术、新工艺;注重实践环节的设置,以促进学生的实际动手能力和创新能力的培养。

5. 注重立体化建设。本套丛书除了主教材外,还将逐步配套学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等,为任课教师提供丰富的配套教学资源,方便教师教学,同时帮助学生复习与自学,使教材更加易教易学。

本套丛书的编写汇聚了全国高校的优势资源,突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关高校教务处及学院的帮助,在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求,我们将对本套丛书不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全同同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议!



教育部高等学校电子科学与技术专业
教学指导分委员会主任
哈尔滨工业大学教授

前 言

进入 21 世纪后,随着以集成电路技术为基石的电子信息技术加速发展,各类电子器件及系统都在朝着小型化、集成化的方向发展,而其中的集成化则不仅意味着要尽可能地实现系统中电路的单芯片集成,而且要实现将包括声、光、电、磁等物理量感知的传感器集成在系统中,实现多功能集成,最为典型的一个研究领域就是微电子机械系统(MEMS),因而带动了包括我们熟知的半导体材料与器件、电介质材料与器件、光电子材料与器件、磁功能材料与器件等电子信息功能材料与器件的深入研究和技术上突飞猛进的发展。目前电子信息材料与器件已经在电子信息产业中占据了主导性的地位,深刻影响到整个社会的经济发展及人们日常生活的方方面面。

以硅为代表的半导体材料与器件的发展,导致了集成电路技术的快速发展,使得人类社会进入了信息化社会,极大地提高了生产效率。按照摩尔定律,目前集成电路工艺技术已经进入了 32nm 和 22nm 的技术节点,为了保证半导体器件的可靠性,就需要引入一些新的介质材料,如采用高 K 介质作为绝缘栅,采用低 K 介质来取代传统的二氧化硅作为层间介质,采用金属铜取代金属铝作为金属连线等。随着集成电路尺寸进一步按比例缩小,就需要对器件的结构和所用的材料进行调整,如采用立体结构器件、碳纳米管晶体管、单电子晶体管和分子电子器件等。玻璃光纤和固体激光器的出现,使得光通信技术开始发展起来,而半导体激光器和探测器的出现,促进了光通信技术的快速发展。磁性材料则在信息存储、传感、光通信、微波通信等领域有着广泛的应用。总而言之,由于这些材料具有良好的声、光、电、磁、力性质及这些物理量之间的耦合效应,它们在电子信息产业中的广泛应用极大地促进了现代电子信息技术的进步。

本书内容广泛全面,基本涵盖了目前广泛使用的几大类主要的电子信息材料与器件。在章节组织和材料选取上,充分考虑到电子信息类学生学习知识的特点,以及与前面所学基础课程的衔接,理论程度适中,对问题的讨论能满足工程实践的需要,尽量避免复杂的数学物理推导过程,克服对某些非典型电子材料过于细节性的阐述。全书既简明扼要地介绍了电子信息材料与元器件的工作原理,又紧密联系工程应用实际,逻辑清晰、重点突出、知识面广,便于自学和参考。

本书由王巍、冯世娟、罗元编写。其中王巍编写了第 1 章、第 4 章、第 5 章、第 7 章~第 9 章;冯世娟编写了第 2 章、第 3 章和第 10 章;罗元编写了第 6 章。全书由王巍统稿。

本书可作为高等工科院校微电子学、电子科学与技术、电子信息科学与技术、光信息科学与技术专业的本科生教材,也可作为自动控制类、计算机类、通信类及相关材料类专业高年级本科生和研究生的教材及教学参考书,还可供从事电子材料与元件的生产、科研及产品研发的专业技术人员提供参考。

由于时间紧迫、作者水平有限,书中定有许多不当之处,敬请读者批评指正。

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电子材料的发展历史	1
1.2 电子材料的重要作用	4
1.3 电子材料与器件的研究现状	4
1.3.1 硅基半导体材料	5
1.3.2 化合物半导体材料	6
1.3.3 半导体自旋电子学材料和器件	8
1.3.4 磁性纳米材料的应用	8
1.3.5 有机光电子材料	9
1.4 电子材料的发展前景	9
第 2 章 晶体材料的结构	12
2.1 晶体的主要特征	12
2.1.1 晶体的点阵结构	13
2.1.2 晶面和密勒指数	14
2.1.3 晶体的宏观对称性	15
2.1.4 晶体的微观对称性	17
2.2 典型晶体的结构	18
2.2.1 密堆积与配位数	18
2.2.2 典型单质共价键晶体的结构	19
2.2.3 典型离子化合物晶体结构	19
2.3 原子间的结合方式	28
2.3.1 吸引力和排斥力	28
2.3.2 离子键	29
2.3.3 共价键	29
2.3.4 金属键	30
2.3.5 范德瓦耳斯力	31
2.4 晶体中的缺陷	33
2.4.1 晶体中的微观缺陷	34
2.4.2 晶体中的宏观缺陷	37
习题	37

第 3 章 半导体材料与应用	38
3.1 半导体材料的物理基础	38
3.1.1 本征半导体	38
3.1.2 半导体中的杂质	39
3.1.3 费米能级和载流子密度	40
3.1.4 电导与霍尔效应	41
3.1.5 非平衡载流子	43
3.2 半导体材料的性质	45
3.2.1 光吸收与光电导	45
3.2.2 电容效应与击穿特性	46
3.2.3 压阻效应与磁阻效应	47
3.2.4 电阻率的温度特性	48
3.3 半导体材料的分类	48
3.3.1 元素半导体材料	49
3.3.2 化合物半导体材料	51
3.3.3 非晶态半导体	53
3.4 半导体材料的制备工艺方法	55
3.4.1 多晶制备工艺	55
3.4.2 单晶制备工艺	55
3.4.3 外延生长技术	59
3.5 半导体材料的应用	65
习题	66
第 4 章 化合物半导体基础	67
4.1 化合物半导体的能带结构	67
4.1.1 化合物半导体的周期性结构	67
4.1.2 半导体的能带理论	70
4.1.3 半导体的有效质量	72
4.1.4 GaAs 的能带结构	75
4.2 载流子的输运过程	76
4.2.1 波尔兹曼输运方程	77
4.2.2 散射机制	78
4.2.3 速度过冲	80
4.2.4 载流子的弹道输运过程	83

4.3 二维电子气	85	5.4.1 HEMT 器件的基本结构	131
4.3.1 二维电子气	85	5.4.2 HEMT 器件的直流特性	132
4.3.2 二维电子气的能量状态	86	5.4.3 HEMT 器件的射频特性	132
4.3.3 二维电子气的光学特性	88	5.4.4 当代 HEMT 技术	135
4.4 半导体异质结	90	5.5 半导体光源	137
4.4.1 异质结的能带突变	90	5.5.1 激光二极管(LD)	137
4.4.2 热平衡时理想异质结的能带图	95	5.5.2 发光二极管(LED)	140
4.4.3 界面态对异质结能带的影响	97	5.5.3 半导体激光器	144
4.4.4 异质结的伏安特性	100	5.6 半导体光电探测器	146
4.5 半导体超晶格	103	5.6.1 光电导探测器的基本特性	146
4.5.1 半导体超晶格的能带结构	103	5.6.2 p-i-n 二极管	148
4.5.2 组分半导体超晶格	105	5.6.3 APD(雪崩击穿二极管)	149
4.5.3 掺杂超晶格	107	5.6.4 MSM(金属-半导体-金属)探测器	150
4.5.4 应变超晶格	107	习题	151
4.5.5 非晶态超晶格	108	第 6 章 光电子材料与器件	153
习题	111	6.1 概述	153
第 5 章 化合物半导体器件	113	6.2 光纤	154
5.1 化合物半导体的物理性质	113	6.2.1 光纤的结构	154
5.1.1 化合物半导体	113	6.2.2 光纤的种类	155
5.1.2 化合物半导体的晶体结构	114	6.2.3 光纤的制备	156
5.1.3 晶格常数	115	6.2.4 光纤的应用	159
5.1.4 光学性质	116	6.3 激光器及材料	162
5.1.5 电学特性	117	6.3.1 固体激光器的工作原理	162
5.2 金属半导体场效应晶体管器件	121	6.3.2 固体激光器基质材料	163
5.2.1 GaAs MESFET 的基本结构	122	6.3.3 固体激光器的激活离子	168
5.2.2 GaAs MESFET 的直流特性	122	6.3.4 几种常见的固体激光器	169
5.2.3 GaAs MESFET 的微波特性	124	6.4 液晶显示材料与器件	171
5.3 异质结双极型晶体管	126	6.4.1 液晶材料的物理性质	171
5.3.1 HBT 器件的基本结构	126	6.4.2 液晶的分类及结构特点	175
5.3.2 HBT 器件的直流特性	127	6.4.3 常用液晶显示器件	177
5.3.3 HBT 器件的高频特性	129	6.4.4 液晶显示技术的发展趋势	182
5.4 高电子迁移率晶体管	131	习题	184
		第 7 章 电介质材料	185
		7.1 概述	185
		7.2 电介质在静电场中的极化	186
		7.2.1 电介质的极化现象	186
		7.2.2 电介质的极化机制	187
		7.3 电介质的动态极化	195

7.3.1	电介质的极化过程	195	8.3	磁性材料的分类	234
7.3.2	复数介电常量	196	8.3.1	抗磁性	234
7.3.3	介电损耗	197	8.3.2	顺磁性	234
7.3.4	极化弛豫与德拜方程	199	8.3.3	反铁磁性	234
7.3.5	复数介电常量与频率和温度的关系	200	8.3.4	铁磁性	235
7.3.6	电介质的电导和击穿	203	8.3.5	亚铁磁性	235
7.4	晶体的压电性质	207	8.4	铁磁交换作用	236
7.4.1	晶体的压电性	207	8.4.1	交换相互作用	236
7.4.2	晶体的介电性质和弹性	208	8.4.2	饱和磁化与居里温度	237
7.4.3	晶体的机电耦合效应	209	8.5	磁畴	238
7.5	晶体的铁电性质	211	8.5.1	磁畴与畴壁	238
7.5.1	自发极化与热释电效应	211	8.5.2	磁畴的形成	239
7.5.2	铁电体与电畴	212	8.5.3	磁化曲线与磁滞回线	240
7.5.3	电滞回线	213	8.5.4	动态磁化	243
7.6	电介质的光学性质	214	8.5.5	磁损耗	245
7.6.1	折射率与双折射	214	8.6	磁性材料的特性	247
7.6.2	电光效应	215	8.6.1	磁各向异性	247
7.6.3	弹光效应	215	8.6.2	磁致伸缩	249
7.6.4	声光效应	215	8.6.3	磁光效应	250
7.6.5	热光效应	216	8.7	磁性材料	251
7.7	钛酸钡的结构与性质	216	8.7.1	软磁材料	251
7.7.1	铁电材料的分类	216	8.7.2	硬磁材料	252
7.7.2	钛酸钡的晶体结构	217	8.7.3	矩磁材料	253
7.7.3	钛酸钡的铁电性质	219	8.7.4	旋磁材料	254
7.8	电介质材料的典型应用	222	8.7.5	非晶磁性材料	254
7.8.1	压电器件	222	8.7.6	纳米晶磁性材料	255
7.8.2	热释电红外探测器	223	8.8	磁性元器件	256
7.8.3	声光器件	225	8.8.1	磁记录元件	256
习题		227	8.8.2	磁光存储	257
第8章	磁电子学材料与器件	228	8.8.3	微波器件	258
8.1	原子磁矩	228	8.8.4	磁光器件	259
8.1.1	原子磁矩	228	习题		260
8.1.2	多电子原子磁矩	230	第9章	电子陶瓷材料	261
8.1.3	原子磁矩计算	231	9.1	概述	261
8.2	物质的磁化	231	9.2	陶瓷材料的结构和性质	262
8.2.1	磁偶极矩	231	9.2.1	陶瓷材料的结构	262
8.2.2	磁化强度与磁极化强度	232	9.2.2	陶瓷材料的性质	265
8.2.3	磁场强度与磁感应强度	232	9.3	电子陶瓷的制备	266
8.2.4	磁导率与磁化率	232	9.4	敏感陶瓷	268
			9.4.1	热敏陶瓷	268

9.4.2 压敏陶瓷.....	273	10.2.2 小尺寸效应	296
9.4.3 气敏陶瓷.....	274	10.2.3 量子尺寸效应	298
9.4.4 湿敏陶瓷.....	276	10.2.4 宏观量子隧道效应	300
9.5 介电陶瓷.....	278	10.2.5 库仑堵塞效应	300
9.5.1 压电陶瓷.....	278	10.2.6 介电限域效应	301
9.5.2 铁电陶瓷.....	282	10.3 纳米材料的制备和加工技术	302
9.5.3 热释电陶瓷.....	283	10.3.1 分子束外延(MBE)	303
9.6 铁氧化物材料.....	285	10.3.2 化学气相淀积(CVD)	303
9.6.1 软磁铁氧化物.....	285	10.3.3 自组装合成技术	304
9.6.2 硬磁铁氧化物.....	286	10.3.4 SPM 加工技术	304
9.6.3 旋磁铁氧化物.....	286	10.3.5 光刻技术	305
9.6.4 矩磁铁氧化物.....	287	10.4 纳米电子学	305
9.6.5 压磁铁氧化物.....	287	10.4.1 从微电子到纳电子	305
9.7 超导陶瓷.....	287	10.4.2 量子电导	306
9.7.1 超导现象.....	288	10.4.3 电子的弹道输运	306
9.7.2 超导体的基本性质.....	289	10.4.4 量子相干效应	306
9.7.3 超导陶瓷的分类.....	290	10.4.5 量子霍尔效应	309
9.7.4 超导陶瓷的应用.....	291	10.5 纳米电子器件	311
习题	292	10.5.1 共振隧穿器件	311
第 10 章 纳米技术与纳米电子学	293	10.5.2 单电子器件	315
10.1 概述	293	10.5.3 纳米 CMOS 器件与 电路	320
10.1.1 纳米技术	293	10.6 纳米技术的发展	322
10.1.2 纳米材料	295	习题	322
10.2 纳米材料的基本效应	296	参考文献	323
10.2.1 表面效应	296		

第 1 章 绪 论

1.1 电子材料的发展历史

以电子学和光电子学为代表的信息产业已成为当今知识经济时代国民经济和社会发展的战略性基础产业和支柱产业,而电子功能材料与器件则是电子学和光电子学的重要物质基础与先导。电子信息材料是以电子或光子为载体,用于制造各种电子及光电子元器件、半导体集成电路、纳米电子器件、磁性元器件、电子陶瓷器件等的材料。电子信息材料是现代电子工业和科学技术发展的物质基础,同时又是一门多学科交叉的科学,涉及电子技术、光学、物理化学、固体物理学和工艺技术等多学科知识。电子信息材料的质量决定了光电子元器件和半导体集成电路的性能好坏,电子新材料的出现将促进新一代电子产品的诞生。电子信息材料作为现代信息产业的基石,支撑着包括通信技术、计算机技术、集成电路及自动化技术等众多信息技术的发展。因此,电子信息材料的发展一直受到人们的关注和重视。

20 世纪是电子信息材料与器件飞速发展的时期。其中标志性的成果是 1950 年人们发明了基于半导体单晶硅材料的双极型晶体管,这一发明极大地促进了电子设备向小型化、轻量化、节能化方向发展,因此它渐渐代替了电子管(晶体管的耗能仅为电子管的百万分之一)。1958 年集成电路的发明使得电子计算机进一步小型化,使人类进入了一个崭新的信息技术时代。制造集成电路的最主要材料之一是硅单晶,其特征是强度高、结晶性好、成本低,可以拉出大尺寸的硅单晶,自然界中储量丰富。晶体管的特殊能力取决于 N 型或 P 型导电的掺杂元素对半导体进行可控掺杂的能力,以及 SiO_2 介质的优良绝缘性能。实际上, SiO_2 是硅的天然氧化物,通过氧化方法可在硅上生长一层质量很高的绝缘层。绝缘层与硅之间的界面上很少留下悬挂化学键和陷阱来俘获电荷。这种理想界面意味着在场效应晶体管隧道里,在绝缘栅之下能够精确而快速地控制电场。尽管电子和空穴穿过硅晶体管隧道区的速度较化合物半导体的理论速度慢,但它兼有优异的介电性能和近于理想的 Si/SiO_2 界面,这使硅材料成为集成电路中的首选材料。然而,为了在晶体管里传导电子,需要多层金属互连。这样,集成电路实际上是一种复合材料体系,它把半导的、绝缘的金属化合物集成在一起,执行复杂任务。所以,集成电路的制造过程是一个非常复杂的工艺过程。

随着半导体器件特征尺寸按等比例缩小,集成电路规模的不断增加,如图 1.1 所示,集成电路的设计面临着许多的新挑战。特别是当集成电路的特征尺寸进入纳米量级之后,如器件的量子效应、高速低功耗设计等问题,有许多有待通过材料的替代来解决。如高性能芯片中的金属连线已经开始用铜来取代铝,以提高速率降低连线电阻;在某些集成电路里开始出现了硅与铬的合金;出于对介电常量高于 SiO_2 的绝缘栅层的需要,人们正在对铪氧化物和各种硅酸盐进行研究。特征尺寸不断缩小的另一种结果是隔离不同材料的总界面面积在显著增加。因此,材料的化学兼容性和互扩散问题就更加严重,对材料的性能需要有更成熟的了解。

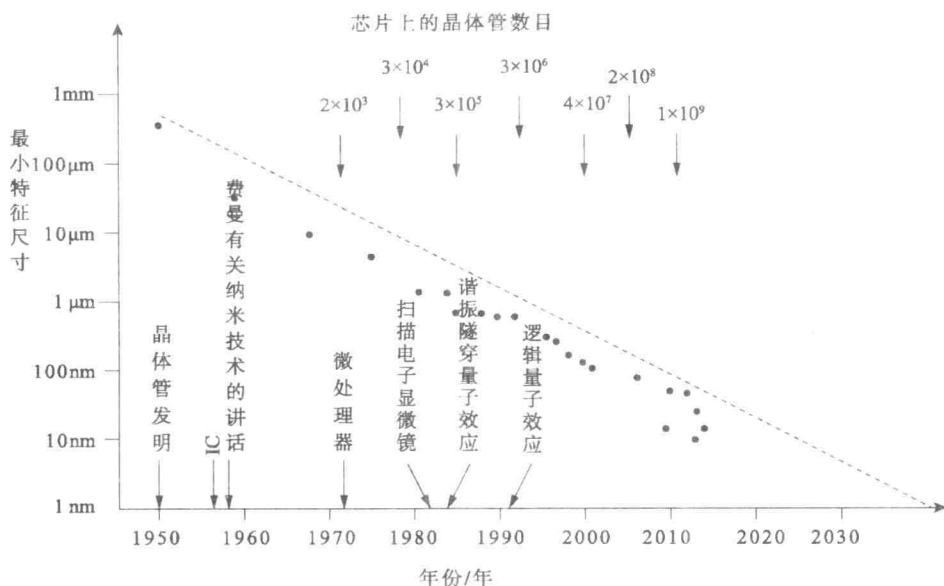


图 1.1 半导体芯片上晶体管数量及特征尺寸的变化趋势

随着半导体芯片在电子产品设计中的广泛应用,各种电子产品(如通信类电子产品、计算机类电子产品、消费类电子产品)的性能得到大幅提高,种类也呈现出爆发式增长的趋势。半导体芯片是 21 世纪信息技术的基石,例如,近几年在互联网技术基础之上兴起的物联网技术,其中最为关键的硬件组件,如电脑中的 CPU、各种类型的半导体存储芯片、RFID 射频识别芯片等构成了整个物联网的基础。可见集成电路技术的应用应用对社会经济发展有着巨大的推动作用。

随着硅基半导体技术的发展趋近于极限,人们已经开始着手研究未来可以取代现有集成电路的新技术。其中,基于碳纳米管(CNT)的电路是未来研究的一个非常重要的方向,碳纳米管可以具有金属特性,也可以具有半导体特性,这取决于碳纳米管碳链的空间螺旋。金属的碳纳米管在室温下具有迄今最高的电导率。半导体的碳纳米管已用来制造电性能良好的晶体管。然而,现在面临的主要问题是按要求的特殊性能合成纳米管,然后再加工制造成电路。目前碳纳米管的一些应用如图 1.2 所示。

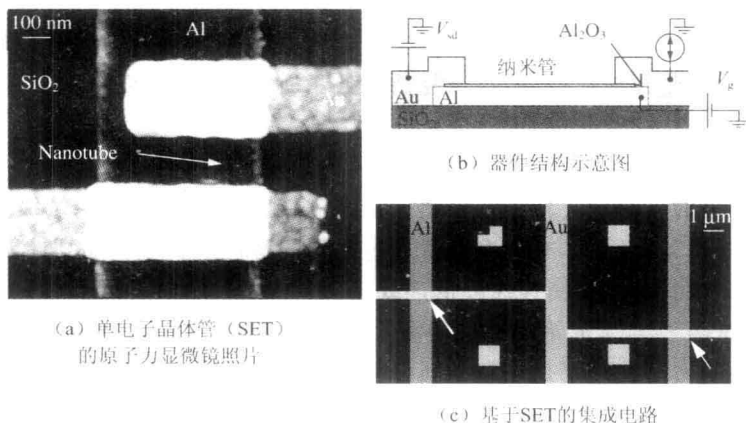


图 1.2 基于纳米管的单电子器件

电子材料和光电子材料在信息的获取、传输、存储、显示及处理和运算过程中发挥了重要的作用。以电子为媒介而传递信息,因为电子的传输速度受其质量(静止质量 $=9.1 \times 10^{-31}$ 千克)影响,有一定限度,所以,随着对信息传输容量和速度的要求不断提高,光子作为更高频率和速度的信息载体就被应用,从而又出现了与电子技术、微电子技术交叉发展的光电子技术。光子材料是指利用光子或光互相作用来实现信息产生、传输、存储、显示、探测及处理的材料,它包括激光晶体、红外材料、液晶、非线性光学材料、光子晶体及光纤材料等。

1960 年第一台红宝石激光器的出现,使光电子技术进入一个新领域。由于激光具有优良的方向性、相干性、单色性和储能性,激光器能产生高达 10^{12} 瓦的峰值功率,产生激光的基质晶体,以及对激光束进行调制的非线性光学材料所构成的系统在通信、光计算、激光医疗、激光印刷、激光影视、激光仪器、激光受控热核反应、激光分离同位素、激光制导等诸多方面有广泛的应用,因此,探索与发展新型光电子材料,制作高性能、小型化、集成化的光电子器件,已成为光电子科技领域的前沿。其中光电子信息材料是光电子技术的基础和先导,这里包括光源和信息获取材料、信息传输材料、信息存储材料以及信息处理和运算材料等,其中主要是各类光电子半导体材料、光纤和薄膜材料,各种液晶显示材料和电色材料、新型相变和光色存储材料、光子选通材料、光致折变材料、新型非线性光学晶体材料等。

固态激光器(包括固体激光器和半导体激光器)以其体积小、重量轻、可靠性好和寿命长等优点,成为新激光技术发展的热点。特别是半导体激光器,因其体积小、可靠性高、价格低、成本极微、光束质量好等优点,是目前使用最广的激光器。目前,日、美等国在研究如何增加波长范围,使得激光器的输出波长从近紫外直至蓝绿光的可见光谱。传统的 AlGaAs 半导体激光器材料,增加铝的浓度,可产生更短的波长输出,但氧化铝也限制了器件的寿命,目前采用分子束外延技术制造的 InGaAsP 半导体激光器,可发射 780~1000nm 范围内任何波长的激光。

光子晶体是 1991 年发现的新型光学材料,其概念来源于固体物理中周期结构思想及电力学中的电磁场理论。光子晶体是一种介质或金属材料在空间呈周期性排列并能自由控制光的人造晶体。光子晶体内部的光学折射率呈周期性分布,由材料的折射率反差形成光子带隙。由于光子的波长与其能量成反比,这种具有周期性排列结构的电介质或金属将阻挡波长处于光子带隙内的光,而允许其他波长的光自由通过。可以通过掺杂来控制光子晶体能带的位置、宽度以及带隙中掺杂模式的形成。由此可见,光子晶体是以类似于半导体的方法来处理光子;半导体的晶体结构控制电荷流,禁止电子在规定的能量范围内通行;而对光子晶体来说,光的能量若与其能带相容则呈导通性,若不相容则呈绝缘性。光子晶体具有超透镜效应、超棱镜效应、复折射、绝缘性、弯曲性等特性。利用它的这些特性,可制作尺寸很小、功能很强的光子器件。利用它的光子带隙,可改善远距离光学信号的传送,从而提高互联网的信息处理速度。

随着现代科学技术的飞跃发展,电子材料的发展体现出如下的发展趋势。其一,功能材料与器件相结合,并趋于小型化与多功能化。特别是外延技术与超晶格理论的发展,使材料与器件的制备可以控制在原子尺度上,这将成为发展的重点。其二,电子材料低维化。低维材料具有体材料不具备的性质。例如,零维的纳米级金属颗粒是电的绝缘体及吸光的黑体,以纳米微粒制成的陶瓷具有较高的韧性和超塑性;纳米级金属铝的硬度为块体铝的 8 倍;作为一维材料的高强度有机纤维、光导纤维,作为二维材料的金刚石薄膜、超导薄膜等都已显示出广阔的应用前景。其三,新型信息功能材料不断涌现。这里主要是指半导体、激光、红外、光电子、液晶、敏感及磁性材料等,它们是发展信息产业的基础。

1.2 电子材料的重要作用

电子材料是电子信息产业的重要组成部分,是发展电子信息产业的基础与先导。电子材料作为基础性材料已渗透到国民经济和国防建设的各个领域,没有高质量的电子材料就不可能制造出高性能的电子元器件,也就没有先进的电子信息系统。电子信息材料及产品支撑着现代通信、计算机、信息网络技术、微机械智能系统、工业自动化和家电等现代高技术产业。电子信息材料产业的发展规模和技术水平,已经成为衡量一个国家经济发展、科技进步和国防实力的重要标志,在国民经济中具有重要战略地位,是科技创新和国际竞争最为激烈的材料领域。

随着电子学向光电子学、光子学迈进,微电子材料在未来 10~15 年仍是最基本的信息材料,光电子材料、光子材料将成为发展最快和最有前途的信息材料。由半导体材料及辅料、光电子材料和新型元器件用材料组成的三大系列,涵盖了现代信息新材料领域的主要方面。信息新材料作为现代信息产业的基石,支撑着通信、计算机、信息家电与网络技术的发展。虽然光电子技术发展非常快,但是以集成电路为主的电子和微电子技术仍然在目前信息技术中占相当大的比重,以硅材料为主体,化合物半导体材料及新一代高温半导体材料共同发展的局面在 21 世纪仍将成为集成电路产业发展的主流。

1.3 电子材料与器件的研究现状

随着信息载体从电子向光电子和光子的转换步伐的加快,半导体光电信息功能材料也已由体材料发展到薄层、超薄层微结构材料,并正向集材料、器件、电路为一体的功能系统集成芯片材料和纳米结构材料方向发展。材料生长制备的控制精度也将向单原子、单分子尺度发展。从材料体系上看,除硅和硅基材料作为当代微电子技术的基础在 21 世纪中叶之前不会改变外,化合物半导体微结构材料以其优异的光电性质在高速、低功耗、低噪声器件和电路,特别是光电子器件、光电集成和光子集成等方面发挥着越来越重要的作用;与此同时,近年来硅和 GaAs、InP 等 III-V 族化合物混合集成技术取得的重大进展,使人们看到了硅基混合光电集成的曙光。有机半导体发光材料以其低廉的成本和良好的柔性,已成为全色高亮度发光材料研发的另一个重要发展方向,预计会在新一代平板显示材料中占有一席之地。GaN 基紫、蓝、绿异质结构发光材料和器件的研制成功,不仅将使光存储密度成倍增长,而更重要的是它将会引起照明光源的革命,经济效益巨大。航空、航天以及国防建设的要求推动了宽带隙、高温微电子材料和中远红外激光材料的发展。探索低维结构材料的量子效应及其在未来纳米电子学和纳米光子学方面的应用,特别是基于单光子光源的量子通信技术,基于固态量子比特的量子计算和无机/有机/生命体复合功能结构材料与器件发展应用,已成为材料科学目前最活跃的研究领域,并极有可能触发新的技术革命,从而彻底改变人类的生产和生活方式。另外,从半导体异质结构材料生长制备技术发展的角度看,已由晶格匹配、小失配材料体系向应变补偿和大失配异质结构材料体系发展。如何避免和消除大失配异质结构材料体系在界面处存在的大量位错和缺陷,这也是目前材料制备中迫切要解决的关键问题之一,它的解决将为材料科学工作者提供一个广阔的创新空间。下面从几个主要方面入手,简单介绍电子材料与器件的研究现状及应用。

1.3.1 硅基半导体材料

硅是当前微电子技术的基础材料,是制作高性能集成电路芯片的主要材料之一。从提高集成电路成品率、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,仍是今后硅单晶研发的主要方向。预计到2015年,12英寸硅片将成为主流产品。随着极大规模硅 ICs 向更小线宽发展,更大直径的硅单晶(如18英寸等)研制也在筹划中。从进一步缩小器件的特征尺寸,提高硅集成电路的速度和集成度看,研制适合于硅深亚微米乃至纳米工艺所需的大直径硅外延片将会成为硅材料发展的另一个主要方向。

根据2007年版“国际半导体技术发展路线图”的预测,集成电路器件的特征线宽,2013年将进入32nm技术代,晶体管物理栅长将是13nm,并于2016年进入到22nm技术代,晶体管物理栅长将是9nm;到2022年,晶体管物理栅长将是4.5nm。这时硅CMOS技术将接近或达到它的“极限”,摩尔定律将受到物理(短沟场效应、绝缘氧化物量子隧穿效应、沟道掺杂原子统计涨落、功耗等)、技术(寄生电阻和电容、互连延迟、光刻技术等)和经济三方面(制造成本昂贵)的挑战。为克服上述器件物理和互连技术限制,人们一方面正在开发诸如高K栅介质、金属栅、双栅/多栅器件、应变沟道和高迁移率材料、铜互连技术(扩散阻挡层)、低介电常量材料、多壁纳米碳管通孔和三维铜互连等技术;另一方面,在电路设计与制造方面,采用硅基微/纳器件混合电路、光电混合集成和系统集成芯片(SoC)技术等,来进一步提高硅 ICs 的速度和功能。

然而,虽然采取上述措施可以延长摩尔定律的寿命,但硅微电子技术最终难以满足人类对信息量需求的日益增长。为此,人们正在积极探索基于全新原理的材料、器件和电路技术,如基于量子力学效应的纳米电子(光电子)技术、量子信息技术、光计算技术和分子电子学技术等。如基于石墨材料的硅基场效应晶体管的研究。石墨是一种严格意义上的二维材料,它是由单原子层的碳原子以蜂窝状结构排列而形成的有序结构,如图1.3所示。石墨是人类已知材料中最薄且最坚固的材料,具有优异的晶体特性和极佳的电学特性。由于石墨层中的电子-光子散射作用非常微弱,因此,即使是在室温的条件下,石墨中的电子迁移率仍高达 $200\,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。并且其载流子饱和速率是硅材料的6~7倍。这些性能使得石墨层成为制作场效应晶体管的一种非常有前途的基础材料,用于制作工作在毫米波段或更高频段的晶体管,其结构如图1.4所示。

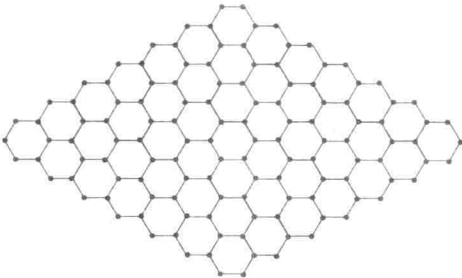


图 1.3 石墨层的结构

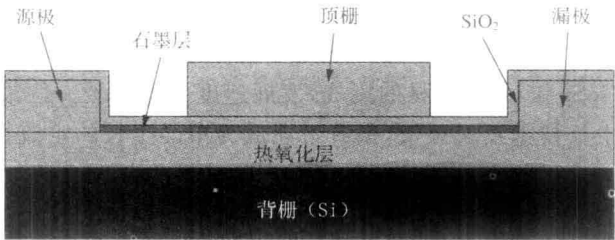


图 1.4 基于双栅极的石墨场效应晶体管

硅基光、电器件集成一直是人们所追求的目标。但由于硅是间接带隙,如何提高硅基材料发光效率就成为一个亟待解决的问题。2001年科研人员将硼离子注入硅中,在硅中引入位错环。位错环形成的局域场调制硅的能带结构,使荷电载流子空间受限,从而使硅发光二极管器件的量子效率提高到0.1%。2002年研究人员将稀土金属离子,如铒、铈等,注入包含有直径为1~2nm的硅纳米晶的富硅二氧化硅中,由于量子受限效应,抑制了非辐射复合过程发生,创造了外量子

效率高达 10% 的硅基发光管的世界纪录。

尽管 GaAs/Si 和 InP/Si 是实现光电子混合集成的理想材料体系,但由于晶格失配和热膨胀系数等不同造成的高密度失配位错而导致器件性能退化和失效,使其难以实用化。研制成功硅基 N-CdS/P-Si 纳米线电注入激光器,使人们看到了硅基光电集成的曙光。

2006 年 6 月美国 Intel 公司成功研制出硅基混合锁模激光器,它是由 InP 和硅片构成,两者通过等离子体工艺键合在一起。光发射来自 InP,硅片作为波导,起着对光的反射和放大而产生激光发射作用;激光脉冲 4ps,重复频率 40GHz,信号由一根光纤输出,可用于 PC 机、服务器和数据中心等。近年来采用热压法,将 GaAs 和 InP 为代表的 III-V 族材料通过范德瓦力无损伤地与硅片键合在一起,从而使硅基光电混合集成的方案取得了进展。硅基有机/无机复合发光材料与器件研究近年来也取得了进展,外量子效率达到 20%。

1.3.2 化合物半导体材料

与半导体硅相比,III-V 族化合物半导体材料以其在高速、大功率、低功耗、低噪声系数等方面的优异光电性能,在射频及微波通信、光纤通信、太阳能电池和显示等方面得到了广泛的应用。GaAs、InP 和 GaN 及其微结构材料是目前最重要、应用最广泛的 III-V 族化合物半导体材料。

以 GaAs 和 InP 为基的晶格匹配和应变补偿的超晶格、量子阱材料已发展得相当成熟,并成功地用来制造超高速、超高频微电子器件和单片集成电路。目前,InP 基双异质结晶体管(HBT)和高电子迁移率晶体管(HEMT)的最高频率都已进入太赫兹;GaAs 基的微波单片集成电路(MMIC)已从军用高端产品发展到民用产品。

基于上述材料体系的光通信用 1.3 μm 和 1.5 μm 的量子阱激光器和探测器,红、黄、橙发光二极管和红光激光器以及大功率半导体量子阱激光器泵源已商品化,表面光发射器件已达到或接近达到实用化水平。目前,研制可工作在 40Gbs/s 以上的 1.5 μm 分布反馈(DFB)激光器,电吸收(EA)调制器单片集成 InP 基多量子阱材料和超高速驱动电路所需的低维结构材料是解决光纤通信瓶颈问题的关键。自从 1994 年美国贝尔实验室发明了基于量子阱子带跃迁和阱间共振隧穿的量子级联激光器(QCLs)以来,QCLs 在向大功率、高温和单模工作等研究方面取得了显著的进展。目前,量子级联激光器的工作波长已覆盖近红外到中、远红外波段(3.4~145 μm)。采用量子级联激光器结构来实现太赫兹波段的激射是一个更为前沿的研究领域。

GaAs 和 InP 单晶的发展趋势是增大晶体直径,提高电学和光学微区均匀性,降低缺陷密度和成本。目前,直径为 6 英寸的 Si-GaAs 和 4 英寸的 InP 已用于集成电路的制造,但受到硅基 GeSi 和 GaN 基材的挑战,发展速度有所减缓。位错密度低的 GaAs 和 InP 单晶的垂直梯度凝固生长技术发展很快,很有可能成为单晶生长的主流技术。

目前半导体量子线、量子点材料生长与制备主要集中在几个比较成熟的材料体系上,如 GaAs、InP 基 In(Ga)As 量子线和量子点、GeSi/Si 量子点等,并在量子点发光器件、量子线场效应晶体管和单电子晶体管、存储器研制方面,特别是量子点激光器研制等方面取得了重大进展。小功率量子点激光器的阈值电流密度(J_{th})已降低到 16 A/cm²,已远低于量子阱激光器的 J_{th} ,并已进入实用化的研发阶段。基于量子点的单电子晶体管、量子点原胞自动机、单光子光源等新型器件原型已研制成功,为其在量子计算、量子通信等量子信息技术方面的应用打下了基础。

应变自组装量子点很容易被嵌入到合适的微腔中,可以实现定向、高效发射,甚至纠缠双光子发射,在研制单光子光源方面具有优势。寻找原子级无损伤加工方法和应变自组装可控生长技术,获得无缺陷的、空间高度有序和大小、形状均匀、密度可控的量子线和量子点材料是发展的