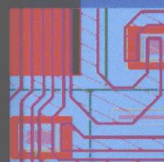




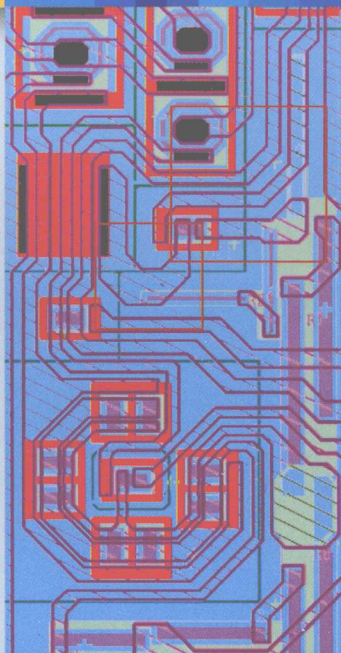
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

半导体器件原理 简明教程

傅兴华 丁 召 编著
陈军宁 杨 健



科学出版社
www.sciencep.com



内 容 简 介

普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

半导体器件原理简明教程

傅兴华 丁 召 编著
陈军宁 杨 健

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书力图用最简明、准确的语言,介绍典型半导体器件的核心知识,主要包括半导体物理基础、pn结、双极型晶体管、场效应晶体管、金属-半导体接触和异质结、半导体光电子器件。本书在阐明基本结构和工作原理的基础上,还介绍了微电子领域的一些新技术,如应变异质结、能带工程、量子阱激光器等。

本书可作为高等院校电子信息与电气学科相关专业半导体器件原理课程的教材,也可供有关科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件原理简明教程/傅兴华等编著. —北京:科学出版社,2010.8
(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 978-7-03-028420-4

I. ①半… II. ①傅… III. ①半导体器件-高等学校-教材 IV. ①TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 145074 号

责任编辑:张 濮 匡 敏 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年8月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—3 500 字数:350 000

定价:30.00 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

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。

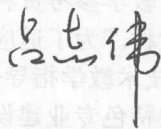
3. 传承精品,吐故纳新。本套丛书吸纳了科学出版社2004年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新版教材更新内容,注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

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。热忱欢迎全国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

序 言

微电子技术按照摩尔定律发展,其伟大成就奠定了现代信息社会的基础。目前微电子技术正处于摩尔时代向后摩尔时代转换的关键时期,硅基微电子技术正在走向三维集成,光电子器件、传感器件和微机械器件等已经集成在硅基集成系统中,新型电子材料和新型信息处理器件不断涌现。在这种大背景下,电子科学与技术的人才培养面临新的挑战。虽然专业课程的基本架构,即理论物理—固体物理—器件原理—集成电路和微电子系统的架构不会改变,但是教学内容必须根据微电子科学与技术的发展有所取舍。另一方面,为了增加学生工程实践能力的培养和训练的课外学时,希望适当压缩课堂教学的时间。

由贵州大学、安徽大学的教师合作编写的《半导体器件原理简明教程》在这方面作了有益的尝试。该书选择 pn 结、双极型晶体管、金属-氧化物-半导体场效应晶体管、金属-半导体接触和异质结、半导体光电子器件作为教学重点,着重强调了这几种半导体器件的基本理论和基本分析方法,并注重学生工程实践能力的培养,教学内容和教学目标取舍得当,可满足高级专业人才培养的要求。该书重点突出,内容精炼,概念清晰,语言流畅。虽为简明教程,但对半导体器件发展的一些新技术也穿插在章节中进行了阐述,如书中关于栅介质击穿、应变异质结、能带工程等方面的论述是其他一些教材很少涉及的内容。

贵州大学早在 1961 年就在物理学专业中开设了半导体专门化课程,是我国最早开展半导体物理和器件本科教学的少数高校之一。贵州省早在 20 世纪 70 年代初就是我国的重要微电子产业基地之一。贵州大学的微电子学科,为贵州省微电子产业的发展提供了强有力的人才和技术支撑。贵州大学、安徽大学合作编写的《半导体器件原理简明教程》的出版,使我们有机会分享他们的教学经验,该书无论是对于学习半导体器件,还是学习集成电路设计与制造,均是一本很好的基础教材,同时也可作为相关专业人员研究与工作的参考书,特向读者推荐。

专用集成电路与系统国家重点实验室

复旦大学 童家榕

2010 年 4 月 19 日

从第一个半导体晶体三极管的发明到现在,只不过经历了短短的 60 多年,发端于半导体器件和集成电路的信息技术,已经对人类社会产生了深刻的、革命性的影响,而且将继续成为推动人类文明与进步的强大动力。半导体器件和集成电路基于半导体材料中电子的输运规律,以及电子与光、电、磁等物质相互作用的基本物理规律,实现了信息的采集、加工、输运和处理,是信息技术最基本的物质载体。学习、了解和掌握这些基本物理规律,是大学本科电子信息类专业“固体电子器件原理”课程的基本目标之一。

本书定名为“简明教程”,是想用最简明、准确的语言,最精简的篇幅,讲清楚基本的半导体物理基础和半导体器件,即同质结和异质结二极管、双极型三极管、场效应晶体管、光电子器件的基本结构和工作原理。虽为简明教程,但本书也包含了一些微电子新技术的内容,如应变异质结、能带工程、量子阱激光器。

Herbert Kroemer 在其 2000 年的诺贝尔演讲中特别强调:“If, in discussing a semiconductor problem, you cannot draw an **Energy Band Diagram**, this shows that you don't know what you are talking about. If you can draw one, but don't, then your audience won't know what you are talking about.”作者在本书的编写和教学实践中,始终强调能带图是讨论和理解半导体器件原理的基础,始终强调画好定性的或半定量的能带图是学好半导体器件原理的基本功。教学实践表明,这种教学方法是成功的。

本书强调了三个“基本”,即基本理论、基本方法和基本目标的思想。基本理论是指半导体器件的基本理论基础,是量子力学及在量子力学基础之上建立起来的固体能带理论。对工科专业的学生,并不要求去做复杂的理论计算,而只要求他们有清晰准确的概念,能进行必要的理论分析和工程计算。基本方法是指学习和掌握半导体器件原理的基本的定量分析方法,即通过求解玻尔兹曼方程(其简单情形为连续性方程)、泊松方程、电流密度方程,得到半导体材料中的电场分布、电势分布和载流子浓度分布。学习半导体器件原理的基本目标是把半导体器件的外特性参数,如电流放大系数、阈值电压、击穿电压等,与构成器件的半导体材料参数和器件的结构参数联系起来,从而具备根据外特性参数的要求设计和制造半导体器件,甚至开发新型半导体器件的能力。

为了学好本课程,要求学生对微电子工艺有感性的认识,为了达此目的,可组织学生到工艺线进行实习;要求学生重点掌握光刻、选择性掺杂、外延与薄膜沉积

等技术概要。

本书按课内 54 学时来编写。对学过固体与半导体物理的电子科学与技术专业的学生,可跳过第 1 章,直接进入第 2 章的学习。对其他电子信息类专业的学生,可省略部分数学推导的内容,缩短到 40 学时左右。本书也适合作为微电子企业技术人员的培训教材,所需学时数为 40 学时左右。在教学过程中,第 3 章和第 4 章的顺序可交换。

自 1994 年以来,本书的主要内容已作为校内讲义,在贵州大学微电子技术专业使用过。在讲义的编写过程中,罗援副教授作出了贡献,谨在此表示感谢。

本书的参考文献标注参照了国标 GB/T 7714—2005。本书的编写和出版得到教育部财政部第三批特色专业“电子科学与技术(贵州大学)”建设项目的资助,还得到贵州省教育厅、贵州大学特色品牌专业建设项目的资助。

限于作者的知识水平,加上微电子技术的快速发展,书中疏漏之处在所难免,恳请使用本书的老师和同学批评指正。

作 者

2010 年 3 月

主要符号表

a	晶格常数, 沟道厚度	f_{β}	共射极电流放大系数截止频率
A	面积	f_m	最高振荡频率
A^*	理查森常数	$f(E)$	费米-狄拉克分布函数
C	电容	F	力
C_D	扩散电容	g_m	跨导
C_G	栅电容	g_{ms}	饱和区跨导
C_{gs}	栅源电容	g_v	激光增益系数
C_{gd}	栅漏电容	G	产生率, 电导
C_{je}, C_{Te}	发射结耗尽层电容	$g(E)$	量子态密度
C_{jc}, C_{Tc}	集电结耗尽层电容	h	普朗克常量
C_{ox}	栅氧化层电容	I	电流强度
D_n	电子扩散系数	I_C	集电极电流
D_p	空穴扩散系数	I_D	漏极电流
D_{nB}	基区电子扩散系数	I_B	基极电流
D_{pE}	发射区空穴扩散系数	I_E	发射极电流
E	能量, 电场	I_L	光电流
E_a	受主能级	I_0	pn 结反向饱和电流
E_c	临界电场	J	电流密度
E_C	导带底能量	J_{th}	阈值电流密度
E_d	施主能级	J_{nom}	标称电流密度
E_F	费米能级	k	玻尔兹曼常量, 波矢
E_{Fn}	电子准费米能级	L	长度
E_{Fp}	空穴准费米能级	L_D	德拜长度
E_g	禁带宽度	L_n	电子扩散长度
E_i, E_{Fi}	本征费米能级	L_p	空穴扩散长度
E_t	复合中心能级	L_{nB}	基区电子扩散长度
E_V	价带顶能量	L_{pE}	发射区空穴扩散长度
f	频率	m	质量
f_T	特征频率	m_0	自由电子质量
f_{α}	共基极电流放大系数截止频率	m_n^*, m_{dn}	导带底电子有效质量

m_p^*, m_{dp}	价带顶空穴有效质量	r_0	集电极-发射极等效电阻
m_l	纵向有效质量	r_μ	集电结等效电阻
m_t	横向有效质量	S	面积
M	雪崩倍增因子	S_b	基区接触条宽
n	电子浓度, 折射率	S_e	发射区条宽
n_i	本征载流子浓度	T	绝对温度
n_0	平衡态电子浓度	t	时间
n_{n0}	n 型区平衡态电子浓度	t_d	延迟时间
n_{p0}	p 型区平衡态电子浓度	t_r	上升时间
N	杂质浓度	t_s	存储时间
N_A	受主杂质浓度	t_f	下降时间
N_D	施主杂质浓度	t_{ox}	栅氧化层厚度
N_C	导带底有效态密度	v	速度
N_V	价带顶有效态密度	v_{max}	饱和速度
p	空穴浓度	$\bar{v}$	热运动平均速度
p_0	平衡态空穴浓度	V	电压
p_{p0}	p 型区平衡态空穴浓度	V_B	击穿电压, 衬底偏置电压
p_{n0}	n 型区平衡态空穴浓度	V_{BE}	发射结电压
q	电子电荷	V_{BC}	集电结电压
Q	电荷	V_{CE}	集电极-发射极电压
Q_D	扩散区电荷密度	V_{DS}	漏极-源极电压
Q_d	耗尽区电荷密度	V_{GS}	栅极-源极电压
Q_n	反型沟道电荷密度	BV_{CBO}	集电结击穿电压
Q_m	金属电极电荷密度	BV_{CEO}	集电极-发射极击穿电压
Q_S	MOS 结构半导体表面电荷密度	BV_{DS}	漏极-源极击穿电压
Q_{ox}	栅氧化层等效电荷密度	BV_{GD}	栅极-漏极击穿电压
Q_{ex}	超量存储电荷密度	V_{FB}	平带电压
Q_{exb}	基区超量存储电荷密度	V_{oc}	开路电压
Q_{exc}	集电区超量存储电荷密度	V_{ox}	栅氧化层电压降
R	电阻, 发射率, 复合率	V_T	阈值电压
R_{max}	最大复合率	V_{Dsat}	饱和漏源电压
$R_\square, R_s$	方块电阻, 薄层电阻	W	空间电荷区宽度
r_b	基极电阻	W_B	中性基区宽度
r_e, r_π	发射结等效电阻	W_E	中性发射区宽度
		x_c	集电结耗尽区宽度

x_{dB}	集电结基区侧耗尽区宽度	$q\phi_s$	半导体功函数
x_{dC}	集电结集电区侧耗尽区宽度	ϕ_B	肖特基势垒高度
x_{dmax}	最大耗尽层厚度	ϕ_{B0}	理想肖特基势垒高度
x_m	线性缓变结耗尽层宽度	γ	发射结注入效率
α	共基极电流增益	η	指数杂质分布梯度因子, 外量子效率
α_i	电离率	η_{cu}	光电子器件注入效率
α_i	受激吸收外的损耗系数	η_{qu}	光电子器件内量子效率
α_a	有源层损耗系数	η_{opt}	光电子器件光效率
α_c	覆盖层损耗系数	θ	临界角
α_{fc}	有源层自由载流子吸收损耗系数	ρ	电阻率, 电荷密度
$\alpha_{fc, x}$	覆盖层自由载流子吸收损耗系数	σ	电导率
α_{sc}	载流子散射损耗系数	τ	寿命
α_{cp}	有源层-覆盖层界面耦合损耗系数	τ_n	电子寿命
α_r	复合率常数	τ_p	空穴寿命
α_T	基区输运系数	τ_{nB}	基区电子寿命
β	共发射极电流放大增益	τ_b	基区渡越时间
χ	电子亲和势	τ_e	发射结势垒内容充放电延迟
χ_i	绝缘介质电子亲和势	τ_d	集电结耗尽区渡越延迟
δ	复合系数	τ_c	集电结势垒内容充放电延迟
δn	非平衡电子浓度	τ_{ec}	载流子输运总延迟
δp	非平衡空穴浓度	λ	波长
ϵ, ϵ_r	相对介电常数	ν	频率
ϵ_s	半导体介电常量	μ_n	电子迁移率
ϵ_0	真空介电常量	μ_p	空穴迁移率
ϵ_{ox}	氧化层介电常量	ω	角频率
ϕ, ψ	电势	ω_α	共基极电流放大系数截止频率
ϕ_s	半导体表面势	ω_β	共发射极电流放大系数截止频率
$\phi_{s,i}$	临界强反型半导体表面势	Γ	光场填充因子
$q\phi_m$	金属功函数		

目 录

丛书序

序言

前言

主要符号表

第 1 章 半导体物理基础	1
1.1 晶体结构	1
1.1.1 基元、点阵和晶格	2
1.1.2 原胞、基矢、晶向和晶面	2
1.1.3 倒格子和倒格子空间	6
1.2 能带结构	7
1.2.1 能带的形成	7
1.2.2 锗、硅和砷化镓的能带结构	9
1.2.3 绝缘体、半导体和导体	10
1.2.4 本征半导体、半导体中的载流子、空穴	11
1.3 半导体中载流子的统计分布	11
1.3.1 状态密度	11
1.3.2 费米统计律和费米分布	12
1.3.3 电子浓度、空穴浓度、玻尔兹曼分布和本征载流子浓度	13
1.3.4 杂质半导体中的电子和空穴浓度、费米能级	14
1.3.5 平衡态系统的费米能级	17
1.4 载流子的漂移运动	18
1.4.1 散射与有效质量	18
1.4.2 迁移率	19
1.4.3 电导率、电阻率、欧姆定律和薄层电阻	22
1.5 载流子的扩散运动	24
1.5.1 扩散电流密度	24
1.5.2 电流密度方程	25
1.5.3 杂质浓度梯度及其感生电场	25
1.6 非平衡载流子	27
1.6.1 载流子的产生与复合、非平衡载流子	27
1.6.2 非平衡载流子的复合、非平衡载流子寿命	28

1.6.3	间接复合理论	29
1.6.4	准费米能级	32
1.6.5	连续性方程	34
1.7	半导体基本方程	36
1.7.1	基本方程	36
1.7.2	泊松方程	37
	习题	38
第2章	pn结	41
2.1	pn结的形成及其基本特性	41
2.2	pn结空间电荷区基本特性的进一步讨论	44
2.2.1	平衡pn结的能带结构和载流子分布	44
2.2.2	非平衡pn结的能带结构和载流子分布	46
2.2.3	pn结的电场和电势分布	50
2.3	pn结的直流特性	54
2.3.1	非平衡pn结扩散区的载流子分布和扩散电流	54
2.3.2	pn结的势垒复合电流和产生电流	56
2.3.3	正偏pn结的大注入效应	58
2.4	pn结的耗尽层电容	60
2.5	pn结的小信号交流特性	61
2.5.1	pn结的扩散电容	61
2.5.2	pn结的交流参数和等效电路	65
2.6	pn结的开关特性	65
2.7	pn结的击穿	67
2.7.1	击穿机理概述	68
2.7.2	雪崩击穿条件	69
2.7.3	雪崩击穿电压的计算	71
	习题	74
第3章	双极型晶体管	77
3.1	双极型晶体管的基本结构	77
3.2	双极型晶体管内载流子的输运过程	79
3.3	双极型晶体管的电流放大系数	82
3.3.1	均匀基区晶体管电流增益因子的简化推导	82
3.3.2	均匀基区晶体管电流增益因子的数学推导	84
3.3.3	缓变基区晶体管的电流放大系数	89
3.3.4	发射区重掺杂条件下的禁带变窄效应	92
3.3.5	大注入效应	94

3.4 晶体管的直流特性	97
3.4.1 晶体管的电流电压方程	97
3.4.2 晶体管的击穿电压	102
3.4.3 纵向基区扩展效应	107
3.4.4 发射极电流集边效应	108
3.4.5 晶体管的安全工作区	111
3.5 双极型晶体管的频率特性	112
3.5.1 双极型晶体管频率特性概述	112
3.5.2 延迟时间的计算	113
3.5.3 晶体管电流放大系数的频率特性	115
3.5.4 晶体管的高频等效电路和最高振荡频率	117
3.6 双极型晶体管的开关特性	121
3.6.1 晶体管工作区域的划分及其饱和和工作状态	121
3.6.2 晶体管的开关过程	124
习题	128
第4章 场效应晶体管	133
4.1 结型场效应晶体管	133
4.1.1 结型场效应晶体管的工作原理	133
4.1.2 JFET 的电流电压方程	135
4.1.3 JFET 的直流参数和频率参数	139
4.1.4 JFET 的短沟道效应	144
4.2 绝缘栅场效应晶体管	145
4.2.1 半导体表面的特性和理想 MOS 结构	145
4.2.2 MOSFET 结构及其工作原理	154
4.2.3 MOSFET 的阈值电压	157
4.2.4 MOSFET 的电流电压关系	163
4.2.5 MOSFET 的亚阈区导电	168
4.2.6 MOSFET 的击穿电压	169
4.2.7 MOSFET 的高频等效电路和频率特性	173
4.2.8 MOSFET 的短沟道效应	176
4.2.9 MOSFET 阈值电压的调整	183
4.2.10 MOSFET 的缩比理论	184
4.2.11 热电子效应和辐射效应	186
习题	190
第5章 金属-半导体接触和异质结	193
5.1 金属-半导体接触	193

5.1.1	理想金属-半导体接触	193
5.1.2	非理想效应	197
5.1.3	金属-半导体接触的电流电压关系	200
5.1.4	欧姆接触的实现方法	202
5.2	异质结	203
5.2.1	异质结半导体材料能带结构的对应关系	203
5.2.2	异质结能带图的画法	204
5.2.3	异质结的基本特性	206
5.2.4	同型异质结	210
5.3	应变异质结	211
	习题	217
第6章	半导体光电子器件	219
6.1	半导体的光吸收和发射	219
6.1.1	光的基本性质	219
6.1.2	光在半导体中的吸收	220
6.1.3	半导体的光发射	224
6.2	太阳能电池	225
6.3	光探测器件	229
6.4	发光二极管	232
6.4.1	发光二极管基础	232
6.4.2	能带工程	234
6.5	半导体激光器件	238
6.5.1	半导体激光器件基础	238
6.5.2	量子阱激光器	244
6.5.3	垂直腔面发射激光器	249
	习题	252
附录		254
附录 A	物理常数	254
附录 B	晶体结构和晶格常数($\text{\AA}$)	255
附录 C	重要半导体的基本性质	256
附录 D	硅、砷化镓和锗的重要性质	257
附录 E	二氧化硅和氮化硅的性质	258
附录 F	硅中的杂质能级	259
附录 G	砷化镓中的杂质能级	260
参考文献		261

第1章

半导体物理基础

基于量子力学基础之上的固体物理学和半导体物理学是学习半导体电子器件的基础。本章简要介绍半导体的晶体结构、能带理论、半导体中的载流子及其运输的相关基础知识。学习用能带图中费米能级的相对位置表示半导体的导电类型和载流子浓度的高低,定量计算半导体中的平衡和非平衡载流子浓度,求解连续性方程和泊松方程,从而得到半导体中的电场分布、电势分布和载流子浓度分布,为后续器件原理的学习打下基础。

1.1 晶体结构

固体材料按其组成原子或分子的排列状况分为晶体和非晶体。如图 1.1 所示,整块固体材料中原子或分子的排列呈现严格一致周期性的称为单晶材料,原子或分子排列只在小范围呈现周期性而在大范围不具备周期性的是多晶材料,原子或分子排列没有任何周期性的是非晶材料。

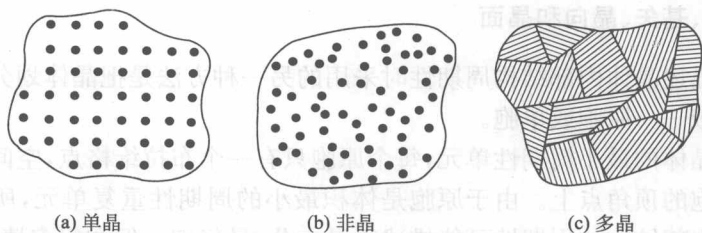


图 1.1 单晶、非晶与多晶原子排列示意图^[14]

半导体单晶材料(以下简称半导体材料、晶体)是导电能力介于金属和绝缘体之间的一类固体材料。但是导电能力的大小并不是半导体材料的本质特征。半导体材料的显著特点是,可以通过掺入杂质等办法,改变其导电能力(可以成数量级变化)和导电类型。半导体的这一重要特性是由半导体的晶体结构、能带结构和电荷的输运性质决定的。对半导体材料进行选择性掺杂是制造各种半导体器件的重要工艺手段。