

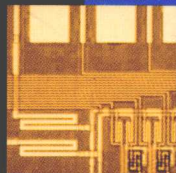


普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家精品课程主干教材
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

半导体器件物理

(第二版)

孟庆巨 刘海波 孟庆辉 编著



科学出版社
www.sciencep.com

国家精品课程主干教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

半导体器件物理

(第二版)

孟庆巨 刘海波 孟庆辉 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书介绍了常用半导体器件的基本结构、工作原理、主要性能和基本工艺技术。全书内容包括：半导体物理基础、PN结、双极结型晶体管、金属-半导体结、结型场效应晶体管和金属-半导体场效应晶体管、金属-氧化物-半导体场效应晶体管、电荷转移器件、半导体太阳能电池及光电二极管、发光二极管和半导体激光器等。

本书可作为高等院校电子科学与技术、微电子学、光电子技术等专业的半导体器件物理相关课程的教材，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

半导体器件物理/孟庆巨,刘海波,孟庆辉编著.—2版.—北京:科学出版社,2009

(国家精品课程主干教材·普通高等教育“十一五”国家级规划教材·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 978-7-03-025979-0

I. 半… II. ①孟…②刘…③孟… III. 半导体器件-高等学校-教材
IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 202073 号

责任编辑:马长芳 张 濮 / 责任校对:李奕莹
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 11 月第 二 版 印张:20 3/4

2009 年 11 月第六次印刷 字数:463 000

印数:9001—12 500

定价:35.00 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,先后第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。

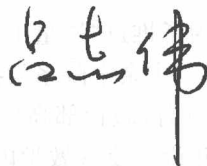
3. 传承精品,吐故纳新。本套丛书吸纳了科学出版社2004年出版的《高等院校电子科学与技术专业系列教材》中受到高校师生欢迎的精品教材。在保证前一版教材准确诠释基本概念、基本理论的基础上,新一版教材更新内容,注重反映本学科领域的最新成果和发展方向,真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

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

2005年1月,科学出版社出版了我和刘海波、孟庆辉编著的《半导体器件物理》。在深入进行教研、教改的过程中,吉林大学建设了“半导体器件物理与实验”课程。“半导体器件物理”与传统的“半导体物理实验”、“半导体器件平面工艺实验”、“半导体器件性能测试实验”三大实验课成为“半导体器件物理与实验”课程的四个模块。

“半导体器件物理与实验”课程于2005年5月和8月先后被评为吉林大学和吉林省精品课程建设项目,于2007年12月被评为国家精品课程建设项目。在课程建设过程中,我们对2005年版的《半导体器件物理》教材进行了修订,修订教材被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

半导体器件种类繁多、结构各异、性能千差万别,新技术、新工艺、新产品层出不穷,发展极其迅速。由于篇幅和学时所限,任何一本教材都无法囊括所有器件及其工艺技术,也不能把每种器件的各个性能详尽地加以介绍,更无法跟上新工艺技术的飞速发展。这一事实使得“半导体器件物理”作为专业基础课永恒地存在着基础与专业、传统与现代、当前与发展的三个矛盾。课程建设的目标就是要不断地解决上述的三个矛盾,永远地追求“三个统一”:“基础精深,专业宽新”的基础与专业的统一,“延续传统,注重现代”的传统与现代的统一,“立足当前,关注发展”的当前与发展的统一。因此,选择有限数量和种类的基本的、主要的、常用的器件,通过对它们的基本结构、工作原理、主要特性和基本工艺技术的介绍,在夯实学生半导体器件物理基础的同时,培养学生具备举一反三、触类旁通和进一步深入学习、研究以及设计半导体器件的能力是本书编写过程中乃至我在教学过程中始终贯彻的指导思想。

近年来,许多教材在章末附有本章小结。小结提纲挈领地给出了本章的知识要点,很有益于学生对知识的系统了解和掌握。考虑到本章小结难免粗阔,本书给出了每节的节小结和教学要求,本章小结在配套出版的《半导体器件物理学习与考研指导》中给出。教学要求是教师从教学的角度根据教学大纲对学生学习本课程提出的要求。教学要求把本节应该掌握的知识以条目列出,学生可以把教学要求作为检验自己学习质量的判据。教学要求中所有问题的答案均在《半导体器件物理学习与考研指导》中给出。

“物理图像清晰,理论运用准确,数学推导正确、简明”是本书编写的原则。在教学过程中,半导体器件中物理过程的解释、公式的理论推导与命题的证明、图表的分析和使用是学生学习的难点。为了不使教材内容臃肿、增加篇幅,书中几乎全部的基本概念、物理过程解释、理论推导与命题证明、图表的分析和使用也均在《半导体器件物理学习与考研指导》中给出。

在教学过程中,有些学生对2005年版中图3-6中发射极电流 I_E 的方向及由此引出的式(3-1)、式(3-7)、式(3-9)、式(3-10)等相应的符号感到不习惯。在修订版中做了改动,类似的改动还有2005年版中的式(5-2)和式(6-68)等。在此,向我的学生表示感谢。

每章末给出了习题和参考文献。解答习题是对知识掌握程度的检验,有些习题是对书中内容的延伸和深入解读。随着学生计算机能力的提高,有些习题要求学生进行数值计算。虽然在教材中没有专门介绍数值计算方法,但在《半导体器件物理学习与考研指导》中也给出了这些习题的答案。

2005年以来,国内外有多部优秀的半导体器件物理方面的相关著作出版。在本书编写过程中,作者参阅和学习了这些著作,并吸纳了其中的许多精华。为了便于读者查阅,同时也为了表达作者对这些著作作者的敬意和感谢,一些主要著作被列于本书各章末的参考文献中。

在本书编写过程中,我的研究生黄飞(现空军航空大学教员)、吉林大学电子科学与工程学院博士生吴国光和研究生沈春生同学耐心地查阅和核对了有关的文献、资料、数据和图表。书中许多图表都由沈春生同学绘制。他们为本书的编写付出了辛勤的劳动。

科学出版社的编辑马长芳、张濮同志十分关心本书的编写情况,她(他)们多次来到吉林大学对编写工作给以热情的帮助和悉心的指导,她(他)们的丰富经验使作者受益良多并为本书的顺利完稿提供了保证。这里对上述同志致以诚挚的感谢。

在编写过程中,作者深感学识之有限,加之时间仓促,书中许多地方虽经多次推敲,仍难以令人满意,故疏漏之处在所难免,恳请广大读者和同行指正。

孟庆巨

2009年9月于吉林大学

第一版前言

本书是作者多年来在吉林大学为微电子、光电子和电子科学与技术等专业本科生讲授半导体物理和半导体器件物理课程的教学实践基础上所编写的一部教材。

半导体器件物理一直是吉林大学微电子、光电子和电子科学与技术等专业的主干专业基础课。半导体器件种类繁多,结构各异,性能千差万别,新技术、新工艺、新产品层出不穷,发展极其迅速。由于篇幅和学时所限,任何一本教材都无法囊括所有器件及其工艺技术,也不可能把每一器件的各种性能一一地详尽介绍,更无法跟踪新工艺技术的飞速发展。因此,根据专业要求,结合一些基本的、主要的、有代表性的常用器件,通过对它们的基本结构、工作原理、主要特性和基本工艺技术的介绍,培养学生具备举一反三、触类旁通的进一步深入学习、研究及设计半导体器件的能力是本书编写过程中始终贯彻的指导思想。这也是作者在教学中始终贯彻的指导思想。

本书共分 10 章。其中第一章为半导体物理基础,这一章所提供的简明而充分的半导体物理知识可作为没有学过半导体物理的读者学习本书以后诸章内容的必要的和足够的准备知识。同时,由于这一章和其后各章的有机结合,也为学习过半导体物理的读者提供了很多的方便。全书由孟庆巨教授主编。中国人民解放军空军航空大学孟庆辉教授和吉林大学刘海波博士参与了本书第四、五、九、十章的编写工作。全书由孟庆巨教授设计、统稿和审核。

在本书编写过程中,作者力图做到物理图像清晰,理论运用准确,数学推导正确,文字叙述简明、流畅。但由于作者学识有限,加之写作时间仓促,错漏之处在所难免。恳请广大读者和同行指正。

在本书编写过程中作者参阅了许多中外有关著作,从中获益匪浅。为了便于读者查阅,同时也为了表达作者对这些作者的敬意,一些主要著作被列于本书的参考文献之中。

在编写本书的过程中,作者同北京大学张国义教授、南开大学曹亚安教授进行过多次有益的讨论。这些讨论使作者受益良多。

吉林大学电子科学与工程学院院长杜国同教授,副院长郭树旭教授和微电子与光电子学系主任贾刚教授对本书的编写工作给予了大力的支持。作者对以上诸位同志一并表示衷心的感谢。

作者

2004 年于吉林大学

主要符号表

a	晶格常数, 宽度	E_1	电离能
a	加速度	E_{1a}	受主电离能
a_1, a_2, a_3	基矢量	E_{1d}	施主电离能
A	面积	E_i	本征费米能级, 禁带中央能量
B	亮度	E_{i0}	体内本征费米能级
b_1, b_2, b_3	倒基矢量	E_{is}	表面本征费米能级
BV_{CB0}	BJT 发射极开路, 集电极-基极击穿电压	E_t	复合中心能级
BV_{CE0}	BJT 基极开路, 集电极-发射极击穿电压	E_v	价带顶能量
c	真空中的光速	\mathcal{E}	电场强度
C	电容	\mathcal{E}_0	氧化层内电场强度
C_D	扩散电容	\mathcal{E}_m	最大电场强度
C_G	栅电容	\mathcal{E}_{mL}	线性缓变结雪崩击穿临界电场强度
C_n	电子俘获系数	\mathcal{E}_{mS}	单边突变结雪崩击穿临界电场强度
C_p	空穴俘获系数	\mathcal{E}_S	半导体表面电场强度, 饱和电场强度
C_o	氧化层电容	F	力
C_T	耗尽层电容	f	频率
C_{TC}	集电结耗尽层电容	f_{3dB}	3dB 频率
C_{TE}	发射结耗尽层电容	f_{c0}	截止频率, 最高工作频率
C_{gs}	栅源电容	f_T	特征频率
C_{gd}	栅漏电容	$f(E)$	费米-狄拉克分布函数
C_{ds}	漏源电容	g	电导, 导纳
D	扩散系数	g_D	直流电导
D_n	电子扩散系数	g_I	沟道电导
D_p	空穴扩散系数	g_l	线性导纳
D_{pC}	集电区空穴扩散系数	g_m	跨导
D_{pE}	发射区空穴扩散系数	G	增益, 产生率
E	能量	G_L	产生率(光照)
E_a	受主能级	h	普朗克常量
E_c	导带底能量	\hbar	约化普朗克常量
E_d	施主能级	h_{FE}	直流共发射极电流增益
E_F	费米能级	h_{fe}	交流共发射极电流增益
E_{FM}	金属费米能级	I	电流强度
E_{Fn}	电子准费米能级	I_0	PN 结饱和电流
E_{Fp}	空穴准费米能级	I_B	基极电流
E_g	禁带宽度		

I_{BA}	临界饱和基极电流	m^*	有效质量张量
I_C	集电极电流	m^{*-1}	有效质量倒数张量
I_{CS}	集电极饱和电流	m_n^*, m_n	各向同性电子有效质量
I_{C0}	集电极反向饱和电流	m_p^*, m_p	各向同性空穴有效质量
I_{CEO}	穿透电流	m_{dn}	导带状态密度有效质量
I_D	漏极电流	m_{dp}	价带状态密度有效质量
I_{DS}	饱和漏电流	m_l	纵向有效质量
I_d	PN 结扩散电流	m_{ph}	重空穴有效质量
I_E	发射极电流	m_{pl}	轻空穴有效质量
I_{E0}	发射极反向饱和电流	m_t	横向有效质量
I_{F0}	BJT 发射结二极管反向饱和电流	N	杂质浓度, 原胞数, 状态密度
I_{R0}	BJT 集电结二极管反向饱和电流	N_a	受主杂质浓度
I_G	空间电荷区产生电流	N_d	施主杂质浓度
I_L	短路光电流	N_c	导带底有效状态密度
I_n	电子扩散电流	N_v	价带顶有效状态密度
I_p	空穴扩散电流	N_t	复合中心浓度
I_{nC}	BJT 集电极电子电流分量	n	电子浓度, 折射率
I_{nE}	BJT 发射极电子电流分量	n_d	施主能级上的电子浓度
I_{pE}	BJT 发射极空穴电流分量	n_i	本征载流子浓度
I_R	空间电荷区复合电流	n_n	N 区电子浓度
I_{RE}	发射结空间电荷区复合电流	n_{n0}	N 区热平衡多子电子浓度
I_r	基区复合电流	n_p	P 区少子电子浓度
i	交变电流	n_{p0}	P 区热平衡少子电子浓度
i_a	交变电流振幅	n_t	杂质能级上电子浓度
j	电流密度	P	功率
j_n	电子扩散电流密度	P	动量, 准动量
j_p	空穴扩散电流密度	p	空穴浓度
j_{TH}	阈值电流密度	p_a	受主能级上的空穴浓度
j_{nom}	名义电流密度(标称电流密度)	p_p	P 区多子空穴浓度
K	玻尔兹曼常量	p_{p0}	P 区热平衡多子空穴浓度
k	电子波矢量	p_n	N 区少子空穴浓度
K_n	倒格矢	p_{n0}	热平衡 N 区少子空穴浓度
L	长度, 沟道长度	p_E	发射区空穴浓度
L_n	电子扩散长度	p_{E0}	发射区热平衡空穴浓度
L_p	空穴扩散长度	p_C	集电区空穴浓度
M	雪崩倍增因子	p_{C0}	集电区热平衡空穴浓度
M	质量	Q	电荷, 品质因数
m_0	电子惯性质量	Q_o	氧化物电荷
m_c	电导有效质量	Q_{os}	等效氧化物电荷
		Q_B	耗尽层单位面积电荷
		Q_{BX}	基区过量存储电荷

Q_C	集电区存储电荷	V	电压, 电势
Q_f	氧化物固定电荷	V_{BL}	线性缓变结雪崩击穿电压
Q_i	反型层单位面积电荷(沟道电荷)	V_{BS}	单边突变结雪崩击穿电压
Q_{it}	界面陷阱电荷	V_C	集电结电压
Q_m	可动离子电荷	V_{CE}	集电极-发射极电压
Q_{ot}	氧化物陷阱电荷	V_D	漏极电压
Q_S	存储电荷, 半导体表面单位面积电荷	V_E	发射结电压
Q_{sig}	信号电荷	V_{FB}	平带电压
q	电子电荷	V_G	栅极电压
q	声子波矢量	V_{oc}	开路电压
R	电阻, 反射率, 复合率, 复合系数	V_p	夹断电压
R_e	电子霍尔系数	V_{p0}	内夹断电压
R_p	空穴霍尔系数	V_{pt}	穿通电压
R_D	漏极电阻	V_{TH}	阈值电压
R_{on}	开态电阻	v_a	交变电压振幅
R_S	源极电阻	$v_{b'e}$	BJT 的 B' 和 E 之间的电压
R_{\square}	薄层电阻	v_g, v_{gs}	交流栅极电压
R_m	晶格矢量	v	速度
r_{ds}	微分漏极电阻	v_n	电子平均漂浮速度
r_e	PN 结扩散电阻	v_p	空穴平均漂浮速度
r_{sc}	集电极串联电阻	v_s	饱和速度
r_{gd}	栅漏电阻	v_{th}	热运动平均速度
r_{gs}	栅源电阻	W	空间电荷区宽度
r_{es}	BJT 的 E 和 E' 之间的串联电阻	x_o	氧化层厚度
$r_{bb'}$	基极扩展电阻	x_B	有效基区宽度
S	表面复合速度	x_C	集电结空间电荷区边界
S	流密度	x_d	空间电荷区厚度
s_n	电子的激发概率	x_{dm}	空间电荷区最大厚度
s_p	空穴的激发概率	x_E	发射区宽度
T	热力学温度, 透射比, 隧穿系数	x_I	反型层厚度
T	平移算符	x_j	结深
t	时间	x_n	PN 结空间电荷区 N 侧厚度
t_d	导通延迟时间	x_p	PN 结空间电荷区 P 侧厚度
t_r	上升时间	y	交流导纳
t_f	下降时间	α	吸收系数, 共基极电流增益
t_s	存储时间	α_F	BJT 正向有源共基极电流增益
U	复合率	α_R	BJT 反向有源共基极电流增益
U_S	表面复合率	β_T	基区输运子
		Γ	光限制因子
		γ	注射效率
		κ	尺寸因子

σ	电导率	ν	频率
ϵ	转移失真率	ρ	电阻率, 电荷密度
ϵ_0	真空介电常量	χ	电子亲和能
ϵ_o	氧化物介电常量	Φ	光通量
ϵ_s	半导体介电常量	ϕ	费米势
ϵ_r	相对介电常数	ϕ_f	体费米势
ϵ_{ro}	氧化物相对介电常数	$q\phi_b$	肖特基势垒高度
ϵ_{rs}	半导体相对介电常数	$q\phi_m$	金属功函数
τ	寿命, 弛豫时间	ϕ_m	金属功函数电势
τ_B	基区渡越时间	ϕ_n	电子准费米势
τ_c	集电结耗尽层电容充电时间	ϕ_p	空穴准费米势
τ_d	介电弛豫时间	$q\phi'_m$	修正金属功函数
τ_E	发射结耗尽层电容充电时间	$q\phi_s$	半导体功函数
τ_n	电子寿命	ϕ_s	半导体功函数电势
τ_p	空穴寿命	$q\phi'_s$	修正半导体功函数
τ_S	与去除 Q_{BX} 相关的时间常数	ϕ_{ms}	金属-半导体功函数电势差
η	转换效率, 量子效率	ϕ'_{ms}	修正金属-半导体功函数电势差
η_D	微分外量子效率	$\psi(x)$	半导体静电势
η_e	外量子效率	ψ_0	内建电势差
η_i	内量子效率	ψ_s	半导体表面势
η_o	逸出率	ψ_{si}	强反型表面势
η_r	辐射效率	ω	角频率
θ	角度	ω_c	截止频率
θ_C	临界角	ω_T	增益-带宽乘积, 特征频率
λ	波长	ω_α	共基极截止频率
λ_C	截止波长	ω_β	共发射极截止频率
μ	迁移率		
μ_n	电子迁移率		
μ_p	空穴迁移率		

目 录

从书序	
第二版前言	
第一版前言	
主要符号表	
第 1 章 半导体物理基础 1	
1.1 半导体中的电子状态 1	
1.1.1 周期性势场 1	
1.1.2 周期性势场中电子的波函数 布洛赫 定理 2	
1.1.3 周期性边界条件 7	
1.2 能带 9	
1.3 有效质量 11	
1.4 导带电子和价带空穴 14	
1.4.1 金属、半导体和绝缘体的区别 14	
1.4.2 空穴 16	
1.5 硅、锗、砷化镓的能带结构 17	
1.5.1 等能面 17	
1.5.2 能带图 18	
1.6 杂质和缺陷能级 20	
1.6.1 施主杂质和施主能级 N 型半导体 20	
1.6.2 受主杂质和受主能级 P 型半导体 21	
1.6.3 III-V 族化合物半导体中的杂质 22	
1.6.4 深能级 22	
1.6.5 缺陷能级 23	
1.7 载流子的统计分布 24	
1.7.1 状态密度 25	
1.7.2 费米分布函数与费米能级 26	
1.7.3 能带中的电子和空穴浓度 26	
1.7.4 本征半导体 28	
1.7.5 只有一种杂质的半导体 29	
1.7.6 杂质补偿半导体 31	
1.7.7 简并半导体 31	
1.8 载流子的散射 36	
1.8.1 格波与声子 37	
1.8.2 载流子的散射过程 39	
1.9 电荷输运现象 41	
1.9.1 漂移运动、迁移率与电导率 41	
1.9.2 扩散运动和扩散电流 43	
1.9.3 流密度、电流密度和电流方程 43	
1.10 非均匀半导体中的自建电场 45	
1.10.1 半导体中的静电场和势 45	
1.10.2 爱因斯坦关系 46	
1.10.3 非均匀半导体和自建电场 46	
1.11 非平衡载流子 48	
1.12 准费米能级 50	
1.12.1 准费米能级的定义 51	
1.12.2 修正的欧姆定律 51	
1.13 复合机制 52	
1.13.1 直接复合 52	
1.13.2 通过复合中心的复合 53	
1.14 表面复合和表面复合速度 56	
1.15 半导体中的基本控制方程 58	
习题 60	
参考文献 61	
第 2 章 PN 结 63	
2.1 热平衡 PN 结 65	
2.1.1 PN 结空间电荷区 65	
2.1.2 电场分布与电势分布 66	
2.2 加偏压的 PN 结 70	
2.2.1 PN 结的单向导电性 70	
2.2.2 少数载流子的注入与输运 72	

2.3 理想 PN 结二极管的直流电流-电压特性	74	3.5 缓变基区晶体管	123
2.4 空间电荷区复合电流和产生电流	80	3.6 基区扩展电阻和电流集聚效应	125
2.4.1 正偏复合电流	80	3.7 基区宽度调变效应	126
2.4.2 反偏产生电流	82	3.8 晶体管的频率响应	127
2.5 隧道电流	82	3.9 混接 π 模型等效电路	130
2.6 温度对 PN 结 I - V 特性的影响	85	3.10 晶体管的开关特性	134
2.7 耗尽层电容、求杂质分布和变容二极管	87	3.11 反向电流和击穿电压	138
2.7.1 C - V 关系	87	3.12* PNP 结构	141
2.7.2 求杂质分布	88	3.13* 异质结双极晶体管	143
2.7.3 变容二极管	89	3.13.1 平衡异质结	143
2.8 PN 结二极管的频率特性	90	3.13.2 加偏压的异质结	146
2.9 PN 结二极管的开关特性	95	3.13.3 异质结双极晶体管放大的基本理论	147
2.9.1 电荷存储效应和反向瞬变	95	3.14* 几类常见的 HBT	148
2.9.2 阶跃恢复二极管	97	习题	149
2.10 PN 结击穿	98	参考文献	150
习题	103	第 4 章 金属-半导体结	153
参考文献	105	4.1 肖特基势垒	154
第 3 章 双极结型晶体管	107	4.1.1 肖特基势垒的形成	154
3.1 双极结型晶体管的结构和制造工艺	108	4.1.2 加偏压的肖特基势垒	155
3.2 双极结型晶体管的基本工作原理	109	4.2 界面态对势垒高度的影响	157
3.2.1 放大作用	110	4.3 镜像力对势垒高度的影响	158
3.2.2 电流分量	111	4.4 肖特基势垒二极管的结构	160
3.2.3 直流电流增益	111	4.5 肖特基势垒二极管的电流-电压特性	161
3.3 理想双极结型晶体管中的电流传输	114	4.6 金属-绝缘体-半导体肖特基二极管	164
3.3.1 载流子分布与电流分量	115	4.7 肖特基势垒二极管和 PN 结二极管的比较	165
3.3.2 正向有源模式	116	4.8 肖特基势垒二极管的应用	166
3.4 埃伯斯-莫尔方程	119	4.8.1 肖特基势垒检波器或混频器	166
3.4.1 埃伯斯-莫尔模型	120	4.8.2 肖特基势垒箝位晶体管	166
3.4.2 工作模式和少子分布	121	4.9 欧姆接触——非整流的 M-S 结	167
		习题	169

参考文献	169	6.6 等效电路和频率响应	217
第 5 章 结型场效应晶体管 and 金属-半导体场效应晶体管	171	6.6.1 小信号参数	217
5.1 JFET 的基本结构和工作原理	171	6.6.2 频率响应	218
5.2 理想 JFET 的 $I-V$ 特性	173	6.7 MOS 场效应晶体管的类型	219
5.3 静态特性	176	6.8 亚阈值区	220
5.3.1 线性区	176	6.9* 影响阈值电压的其余因素	221
5.3.2 饱和区	176	6.10* 器件尺寸按比例缩小	223
5.3.3 击穿电压	177	6.10.1 短沟道效应	223
5.4 小信号参数和等效电路	178	6.10.2 器件的小型化	225
5.5 JFET 的最高工作频率	181	习题	227
5.6 夹断后的 JFET 的性能	182	参考文献	228
5.7 金属-半导体场效应晶体管	184	第 7 章 电荷转移器件	231
5.8 JFET 和 MESFET 的类型	185	7.1 电荷转移	231
5.9* 异质结 MESFET 和 HEMT	186	7.2 深耗尽状态和表面势阱	232
习题	188	7.3 MOS 电容的瞬态特性	234
参考文献	188	7.4 信号电荷的输运传输效率	237
第 6 章 金属-氧化物-半导体场效应晶体管	191	7.5 电极排列和 CCD 制造工艺	239
6.1 理想 MOS 结构的表面空间电荷区	192	7.5.1 三相 CCD	240
6.1.1 半导体表面空间电荷区	193	7.5.2 二相 CCD	241
6.1.2 载流子积累、耗尽和反型	193	7.6 埋沟 CCD	242
6.1.3 反型和强反型条件	195	7.7 信号电荷的注入和检测	244
6.2 理想 MOS 电容器	197	7.7.1 信号电荷的注入	244
6.3 沟道电导与阈值电压	204	7.7.2 信号电荷的检测	245
6.4 实际 MOS 的电容-电压特性和阈值电压	205	7.8 集成斗链器件	246
6.4.1 功函数差的影响	206	7.9* 电荷耦合图像器	247
6.4.2 界面陷阱和氧化物电荷的影响	207	习题	248
6.4.3 阈值电压和 $C-V$ 曲线	209	参考文献	248
6.5 MOS 场效应晶体管	212	第 8 章 半导体太阳电池和光电二极管	249
6.5.1 基本结构和工作原理	212	8.1 半导体中光吸收	249
6.5.2 $I-V$ 特性	213	8.2 PN 结的光生伏打效应	251
		8.2.1 太阳电池的基本结构	251
		8.2.2 PN 结的光生伏打效应	252
		8.3 太阳电池的 $I-V$ 特性	253
		8.4 太阳电池的效率	255
		8.5 光产生电流与收集效率	256

8.6	影响太阳电池效率的因素	258	9.3	LED 的特性参数	284
8.7	肖特基势垒和 MIS 太阳电池	261	9.3.1	I - V 特性	284
8.8*	非晶硅(a -Si)太阳电池	263	9.3.2	量子效率	285
8.8.1	非晶硅 PIN 结太阳电池	263	9.3.3	光谱分布	289
8.8.2	非晶硅肖特基势垒太阳电池	264	9.4	可见光 LED	292
8.9	光电二极管的基本结构与工作原理	264	9.4.1	GaP LED	293
8.9.1	PIN 光电二极管	265	9.4.2	$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ LED	293
8.9.2*	雪崩光电二极管	265	9.4.3	GaN LED	294
8.9.3*	金属-半导体光电二极管	267	9.5	红外 LED	295
8.9.4*	异质结光电二极管	267	9.6*	异质结 LED	296
8.10	光电二极管的特性参数	268	9.7*	半导体激光器及其基本结构	297
8.10.1	量子效率和响应度	268	9.8	半导体受激发射的条件	298
8.10.2	响应速度	269	9.8.1	粒子数反转分布	299
8.10.3	噪声特性	270	9.8.2	光学谐振腔	302
8.10.4	其他几个概念	270	9.8.3	振荡的阈值条件	302
	习题	272	9.8.4	阈值电流	303
	参考文献	273	9.9	结型半导体激光器的特性	304
第 9 章	发光二极管和半导体激光器	275	9.9.1	阈值特性	304
9.1	辐射复合与非辐射复合	275	9.9.2	转换效率	305
9.1.1	辐射复合	276	9.9.3	光谱分布	307
9.1.2	非辐射复合	281	9.10	异质结激光器	308
9.2	LED 的基本结构和工作原理	283	9.10.1	单异质结激光器	308
			9.10.2	双异质结激光器	309
				习题	310
				参考文献	310
				附录	311

注:上角标有*的章节为阅读或选讲内容