

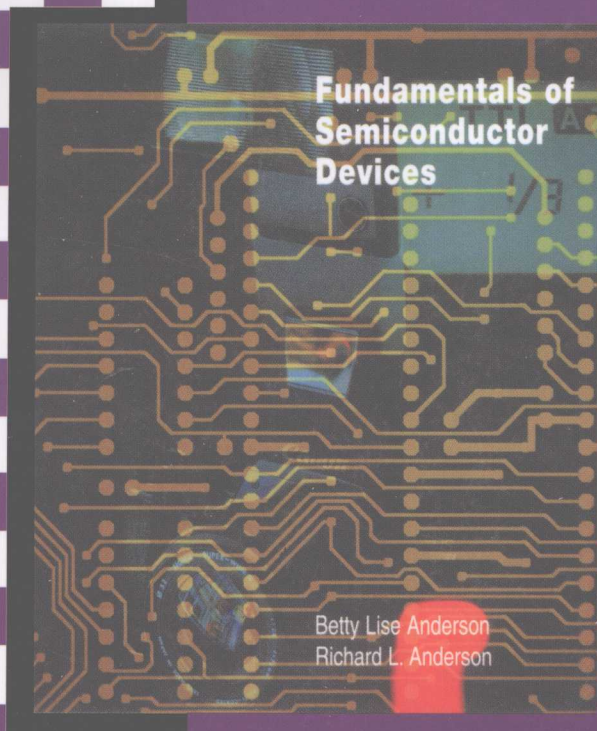
Mc
Graw
Hill Education

国外大学优秀教材——微电子类系列（翻译版）

半导体器件基础

(美) Betty Lise Anderson 著
Richard L. Anderson

邓宁 田立林 任敏 译



清华大学出版社

TN303/42

2008

国外大学优秀教材——微电子类系列（翻译版）

半导体器件基础

(美) Betty Lise Anderson 著
Richard L. Anderson

邓宁 田立林 任敏 译



清华大学出版社
北京

Betty Lise Anderson and Richard L. Anderson
Fundamentals of Semiconductor Devices
EISBN:0-07-236977-9

Copyright © 2005 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition is published and distributed exclusively by Tsinghua University Press under the authorization by McGraw-Hill Education (Asia) Co., within the territory of the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字翻译版由美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经许可之出口视为违反著作权法,将受法律之制裁。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2006-0562

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件基础/(美)安德森(Anderson, B. L.), (美)安德森(Anderson, R. L.)著;邓宁,田立林,任敏译.—北京:清华大学出版社,2008.3

书名原文: Fundamentals of Semiconductor Devices
(国外大学优秀教材——微电子类系列:翻译版)

ISBN 978-7-302-16413-5

I. 半… II. ①安… ②安… ③邓… ④田… ⑤任… 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(2007)第 169594 号

责任编辑:王敏稚

责任校对:白蕾

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:40 字 数:971 千字

版 次:2008 年 3 月第 1 版 印 次:2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:69.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系
调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:020380-01

常数

常用物理常数

真空中光速	c	2.9979×10^8 m/s
真空介电常数	ϵ_0	8.8542×10^{-12} F/m
		8.8542×10^{-14} F/cm
玻尔兹曼常数	k	1.38×10^{-23} J/K
		8.62×10^{-5} eV/K
普朗克常数	h	6.63×10^{-34} J · s
		4.14×10^{-15} eV · s
h-bar	\hbar	1.06×10^{-34} J · s
		6.59×10^{-16} eV · s
室温下 kT ($T=300$ K)	kT	0.0259 eV
	kT/q	0.0259 V
自由电子质量(静止)	m_0	9.11×10^{-31} kg
电子电荷	C	1.60×10^{-19} C

常用半导体参数

	Silicon	GaAs	Ge	InP
E_g	1.1242 eV	1.43 eV	0.67 eV	1.35 eV
N_C	2.86×10^{19} cm ⁻³	4.4×10^{17} cm ⁻³	1.05×10^{19} cm ⁻³	2.02×10^{18} cm ⁻³
N_V	3.10×10^{19} cm ⁻³	8.4×10^{18} cm ⁻³	4.0×10^{18} cm ⁻³	6.8×10^{18} cm ⁻³
n_i	1.08×10^{10} cm ⁻³	2.2×10^6 cm ⁻³	1.64×10^{13} cm ⁻³	1.97×10^7 cm ⁻³
χ	4.05 eV	4.07	4.0	4.35
ϵ_r	11.8	13.2	16.0	12.4
	(SiO ₂ :3.9)			
v_{sat}	1×10^7 cm/s	6×10^6 cm/s	6×10^6 cm/s	
(本征)	(电子和空穴)	(电子)	(电子和空穴)	
E_{pho}	0.063 eV	0.034 eV	0.034 eV	

电子有效质量(以电子的静止质量 m_0 为单位)

	$m_{(K=0)}^*$	$m_{ }^*$	m_{\perp}^*	m_{ce}^*	m_{dse}^*
Si		0.92	0.197	0.26	1.09
GaAs	0.067			0.067	0.067
Ge		1.64	0.082	0.12	0.56
InP	0.077			0.077	0.077

几种半导体价带空穴的有效质量

	m_{lh}^*	m_{hh}^*	m_{sh}^*	Δ (eV)	m_{ch}^*	m_{dsh}^*
Si	0.16	0.48	0.24	0.044	0.36	1.150
GaAs	0.082	0.45	0.15	0.34	0.34	0.48
Ge	0.044	0.28	0.08	0.29	0.21	0.292
InP	0.08	0.4	0.15	0.11	0.3	0.42

单位换算

1 eV	1.6×10^{-19} J
1 cm	10^{-2} m
	10^8 Å
	10^4 μm

单位换算

1 Å	10^{-10} m
	10^{-8} cm
	0.1 nm
0°C	273.18 K
1 特斯拉	1 Wb/m ²
	10^4 高斯

元素周期表

I			II		VIII																																																																																																																																																																																																																																																												
原子序数	元素符号	原子量 (AMU)	原子序数	元素符号	原子量 (AMU)	原子序数	元素符号	原子量 (AMU)	原子序数	元素符号	原子量 (AMU)	原子序数	元素符号	原子量 (AMU)	原子序数	元素符号	原子量 (AMU)	原子序数	元素符号	原子量 (AMU)	原子序数	元素符号	原子量 (AMU)																																																																																																																																																																																																																																										
1	H	1.008	2	He	4.003	3	Li	6.940	4	Be	9.013	5	B	10.82	6	C	12.01	7	N	14.01	8	O	16.00	9	F	19.00	10	Ne	20.18	11	Na	22.99	12	Mg	24.32	13	Al	26.98	14	Si	28.09	15	P	30.98	16	S	32.07	17	Cl	35.46	18	Ar	39.94	19	K	39.10	20	Ca	40.08	21	Sc	44.96	22	Ti	47.90	23	V	50.95	24	Cr	52.01	25	Mn	54.94	26	Fe	55.85	27	Co	58.94	28	Ni	58.71	29	Cu	63.54	30	Zn	65.38	31	Ga	69.72	32	Ge	72.60	33	As	74.91	34	Se	78.96	35	Br	79.92	36	Kr	83.80	37	Rb	85.48	38	Sr	87.63	39	Y	88.92	40	Zr	91.22	41	Nb	92.91	42	Mo	95.95	43	Tc	98.44	44	Ru	101.14	45	Rh	102.96	46	Pd	106.47	47	Ag	107.94	48	Cd	112.49	49	In	114.90	50	Sn	118.71	51	Sb	121.85	52	Te	127.65	53	I	126.90	54	Xe	131.3	55	Cs	132.9	56	Ba	137.4	57	La	138.9	72	Hf	178.5	73	Ta	181.0	74	W	183.9	75	Re	186.2	76	Os	190.2	77	Ir	192.2	78	Pt	195.1	79	Au	197.0	80	Hg	200.6	81	Tl	204.4	82	Pb	207.2	83	Bi	209.0	84	Po	210.8	85	At	210.8	86	Rn	222	87	Fr	223	88	Ra	226	89	Ac	227	90			91			92			93			94			95			96			97			98			99			100		

译者序

随着全球信息产业的飞速发展和经济全球化的进程,信息技术在经济发展中的地位越来越重要,信息技术已经渗透到生活、经济、国防、航天等各个领域,无所不在。2005年,信息产业首次超过钢铁产业,成为全球最大的产业。而信息技术的发展,则越来越依赖于微电子技术的进步。作为信息技术与产业基础的微电子技术已经成为衡量一个国家科技发展水平的重要标志。

当前,我国的微电子产业已经进入了高速发展的阶段。多条12"生产线的建成和投产,标志着我国集成电路的生产技术也进入世界先进水平。从产业需求来看,我国微电子领域的人才不是过多,而是紧缺。随着集成电路尺寸越来越小,半导体物理和器件方面的知识和基础对于从事微电子技术方面工作的研究人员就显得尤其重要。因此,清华大学微电子学研究所的邓宁副教授、田立林教授等,共同翻译了 *Fundamentals of Semiconductor Devices* 一书。本书不仅可以作为微电子专业本科生的教材,对于从事微电子相关研究(尤其是从事器件级研究工作)的研究人员来说,也是一本很好的参考书。

作者 Betty Lise Anderson 博士是美国俄亥俄州立大学工学院电机工程系的教授,讲授多门本科生和研究生的课程。曾经在工业界(Tektrix, Inc., Draper Labs, and GTE Laboratories 等)工作过九年,有丰富的研究经验。本书也被包括美国、中国台湾地区在内的多所著名大学选作教材和教学辅导用书。全书分为5个部分,共11章,全面介绍了半导体材料的基本性质和半导体器件的基本工作原理。从器件物理和工程应用的角度对现代半导体器件进行了全面的和注重实际的讲述。在内容方面,本书不仅介绍了量子力学、半导体物理和半导体器件(包括二极管、场效应晶体管、双极型晶体管和光电器件)的基本工作原理等内容,还包括现代半导体器件的最新进展以及器件的应用。本书在重点介绍硅材料和硅器件的基础上,还介绍了化合物半导体器件、合金器件(如 SiGe, AlGaAs)和异质结器件。作者特别强调对决定半导体材料和器件电学特性的物理过程的理解以及器件的实际应用。通过本书学习,不仅可以系统地掌握器件物理原理,同时能够对先进的半导体器件技术有一个初步的了解,有利于今后进一步的学习和研究。

译者

2007年10月

前言

这是一本关于半导体器件工作原理的教科书,不仅适合电子工程系、计算机系、物理系和材料系的本科生和低年级研究生使用,也可以作为从事现代半导体器件方面工作的科研和工程技术人员的参考书。

学习本课程需要具备基本电子电路的知识以及物理和化学的基础,通常大学一、二年级的学生都已经学过这些知识。

本书的内容可以作为半导体器件两个学期的课程。如果去掉其中比较前沿的内容,并把部分章节作为“只读”教程,也可以用作一学期的课程。在内容组织上,有一些详细的推导,跳过这些内容不会影响学生对其余部分的理解。这部分内容用星号(*)标注。

本书分为5个部分:

1. 半导体材料
2. 二极管
3. 场效应晶体管
4. 双极型晶体管
5. 光电器件

前4个部分后面都有补充内容,这些内容并不是理解半导体器件的基本工作原理所必需的,教师可以自己决定如何教授这些相关知识。比如,书中简单介绍了对于二极管、场效应晶体管和双极型晶体管,如何使用SPICE模型进行器件和电路分析。在电路课程中一般都会讲到SPICE,而了解表征器件的不同参数的来源是十分有用的。考虑到有的学校在电路分析课上可能没有教授过SPICE方面的内容,或者相对半导体器件课程的先后顺序不同,因此,我们把这部分内容放到补充内容部分以供参考。

第1部分“材料”包括4章和两部分补充内容。前两章包含大量的关于先修课程的回顾和总结。之所以包含这些内容,是因为在后面分析器件工作原理时会经常用到。根据先修课程的具体内容,很多章节可以作为课外阅读的材料。

在这样一门课中,把量子力学的内容讲解到什么程度,有很大的选择余地。因此,本书在第1部分介绍了量子力学的基本概念。如果了解更多量子力学的内容,可以在第1部分的补充内容A中找到更详细的论述。

对于特定的一类器件来说(如二极管、场效应晶体管、双极型晶体管和光探测器),大尺寸器件和小尺寸器件的基本工作原理是相同的,但是不同参数对器件工作的相对重要性取决于器件的尺寸。本书首先介绍大尺寸器件的一般工作原理。对于每一种器件,我们先介绍原型器件(例如突变结、长沟道场效应晶体管),通过对原型器件的分析,掌握基本的器件物理知识;之后会介绍考虑二级效应的更加切合实际的模型。这些二级效应对于现代小尺寸器件的电学特性有十分显著的影响。教师可以根据要求或时间情况决定讲授的深度。

本书还讨论了通常在本科生教材中不涉及的问题:

- 进行态密度和电导率计算时,电子和空穴有效质量的差异。
- 电子和空穴作为多子和少子时的迁移率以及扩散系数的差异。
- 双极型晶体管基区的掺杂梯度(和/或异质结双极型晶体管的组分)对电流增益和开关速度的影响。
- 简并半导体禁带变窄效应。虽然禁带变窄效应对于二极管和场效应晶体管的影响很小,但是该效应对双极型晶体管发射极的影响可以导致电流增益降低大约一个数量级。
- 亚微米沟道长度的现代场效应晶体管沿沟道方向的电场导致的速度饱和和效应。与忽略该效应的计算结果相比,该效应使得电流降低约一个数量级。

本书的重点是硅和硅器件,但是,由于禁带工程可能提高器件的性能,本书还介绍了化合物半导体器件、合金器件(如 SiGe, AlGaAs)和异质结器件(不同组分半导体材料形成的结)的工作原理。

每一章的最后都列出了所引用的参考文献。其中,许多 1990 年以前发表的关于半导体器件的基本文献在 S. M. Sze(施敏——译者注)编著的“Semiconductor Devices: Pioneering Papers”一书中再版,该书于 1991 年由新加坡世界出版公司出版。

器件制作虽然是半导体工程中的重要组成部分,但是往往由于时间的关系被省略掉。这部分内容在附录 C 中介绍,如果需要,可以当作只读章节学习。

致谢

首先,我们要感谢 Bill 和 Claire(Bill 和 Claire 分别是二位作者的先生和夫人),两人给予我们关爱、支持、耐心和帮助。还要感谢匿名评审人员提出的意见和建议,感谢麦格劳-希尔公司工作人员的帮助。感谢我们的学生对本书提出有益的建议。最后,感谢所有为本书提供图片和数据的公司和个人。

Betty Lise Anderson

Richard L. Anderson

目录

译者序 I
前言 III

第 1 部分 半导体材料 1

第 1 章

半导体中电子的能量和状态 2

- 1.1 引言 2
- 1.2 历史回顾 2
- 1.3 氢原子实例 3
 - 1.3.1 氢原子的玻尔模型 3
 - 1.3.2 玻尔模型在分子方面的应用：
共价键 8
 - 1.3.3 量子数和泡利不相容原理 9
 - 1.3.4 晶体中的共价键 10
- 1.4 波粒二象性 15
- 1.5 波函数 16
 - 1.5.1 几率和波函数 16
- 1.6 电子波函数 16
 - 1.6.1 一维空间的自由电子 17
 - 1.6.2 德布罗意关系 19
 - *1.6.3 三维空间的自由电子 19
 - 1.6.4 准自由电子模型 20
 - 1.6.5 反射和隧穿 24
- 1.7 光发射和光吸收初探 25
- 1.8 晶体结构、晶面和晶向 29
- 1.9 总结 31
- 1.10 阅读清单 31
- 1.11 参考文献 31
- 1.12 复习题 32
- 1.13 习题 32

第 2 章

均匀半导体 36

- 2.1 引言 36
- 2.2 晶体中的电子的准经典力学 37
 - 2.2.1 一维晶体 37
 - *2.2.2 三维晶体 41
- 2.3 导带结构 42
- 2.4 价带结构 43
- 2.5 本征半导体 44
- 2.6 非本征半导体 46
 - 2.6.1 施主 46
 - 2.6.2 受主 48
- 2.7 空穴的概念 50
 - 2.7.1 空穴的电荷 50
 - *2.7.2 空穴的有效质量 51
- 2.8 能带中电子的态密度函数 52
 - 2.8.1 态密度和态密度有效
质量 52
- 2.9 费米-狄拉克统计 53
 - 2.9.1 能带中电子和空穴的
费米-狄拉克统计 54
- 2.10 电子和空穴按能量的分布 56
- *2.11 非简并半导体中载流子浓度对
温度的依赖关系 65
 - *2.11.1 高温下的载流子浓度 66
 - *2.11.2 低温下的载流子浓度
(载流子冻结) 69
- 2.12 简并半导体 69
 - 2.12.1 杂质导致的禁带变窄 70
 - 2.12.2 表观禁带变窄 72
 - 2.12.3 简并半导体中的载流
子浓度 73

- 2.13 总结 74
 - 2.13.1 非简并半导体 75
 - 2.13.2 简并半导体 76
- 2.14 阅读清单 76
- 2.15 参考文献 76
- 2.16 复习题 77
- 2.17 习题 77

第 3 章

均匀半导体中的电流 83

- 3.1 引言 83
- 3.2 漂移电流 83
- 3.3 载流子迁移率 86
 - 3.3.1 载流子散射 89
 - 3.3.2 散射迁移率 90
 - 3.3.3 杂质带迁移率 92
 - 3.3.4 温度对迁移率的影响 94
 - 3.3.5 强场迁移率 94
- 3.4 扩散电流 96
- 3.5 载流子的产生和复合 99
 - 3.5.1 带间产生和复合 99
 - 3.5.2 两步过程 99
- 3.6 半导体中的光过程 100
 - *3.6.1 光吸收 100
 - *3.6.2 光发射 103
- 3.7 连续性方程 104
- 3.8 少数载流子寿命 107
 - 3.8.1 上升时间 109
 - 3.8.2 下降时间 109
- 3.9 少数载流子扩散长度 111
- 3.10 准费米能级 113
- 3.11 总结 115
- 3.12 阅读清单 116
- 3.13 参考文献 116
- 3.14 复习题 117
- 3.15 习题 118

第 4 章

非均匀半导体 121

- 4.1 平衡态下费米能级的一致性 121
- 4.2 梯度掺杂 122
 - 4.2.1 爱因斯坦关系 126
 - 4.2.2 基区梯度掺杂晶体管 126
- *4.3 非均匀组分半导体 129
- *4.4 梯度掺杂和梯度组分同时存在的情况 131
- 4.5 总结 133
- 4.6 阅读清单 133
- 4.7 参考文献 133
- 4.8 复习题 133
- 4.9 习题 134

第 1 部分补充内容:

材料 136

补充内容 1A

量子力学介绍 137

- S1A.1 引言 137
- S1A.2 波函数 137
- S1A.3 几率和波函数 138
 - *S1A.3.1 一维势阱中的粒子 139
- S1A.4 薛定谔方程 140
- S1A.5 电子的薛定谔方程 141
- S1A.6 量子力学的一些结论 142
 - S1A.6.1 自由电子 142
 - S1A.6.2 准自由电子 143
 - S1A.6.3 势阱 144
 - S1A.6.4 一维无限深势阱 145
 - S1A.6.5 有限深势垒的反射和透射 147
 - S1A.6.6 隧穿 148
 - S1A.6.7 有限深势阱 154

S1A.6.8 氢原子再探 156

S1A.6.9 不确定原理 156

S1A.7 总结 159

S1A.8 复习题 160

S1A.9 习题 160

补充内容 1B

关于材料的补充问题 163

S1B.1 载流子浓度和迁移率的测量 163

S1B.1.1 电阻率测量 163

S1B.1.2 霍尔效应 164

S1B.2 束缚态电子的费米-狄拉克统计 166

S1B.3 半导体中的载流子冻结 169

S1B.4 声子 170

*S1B.4.1 声子对载流子的散射 173

S1B.4.2 电子的间接跃迁 174

S1B.5 总结 175

S1B.6 阅读材料 176

S1B.7 参考文献 176

S1B.8 复习题 176

S1B.9 习题 176

第 2 部分

二极管 179

第 5 章

原型同质 pn 结 183

5.1 引言 183

5.2 原型同质 pn 结(定性讨论) 184

5.2.1 原型 pn 结的能带图 184

5.2.2 同质 pn 结的电流描述 190

5.3 原型同质 pn 结(定量分析) 194

5.3.1 平衡能带图(突变结) 194

5.3.2 外加偏压下的能带图 196

5.3.3 同质 pn 结的电流-电压特性 201

5.3.4 反向偏压下的击穿 217

5.4 原型同质 pn 结的小信号电阻 219

5.4.1 结电阻 220

5.4.2 结电容 221

5.4.3 存储电荷电容 222

5.5 瞬态特性 226

5.5.1 关断的瞬态特性 226

5.5.2 开启的瞬态特性 228

5.6 温度效应 231

5.7 总结 231

5.7.1 内建电势差 232

5.7.2 结区宽度 232

5.7.3 结电流 233

5.7.4 结击穿 234

5.7.5 电容 234

5.7.6 瞬态特性 235

5.8 阅读清单 235

5.9 复习题 235

5.10 习题 235

第 6 章

二极管的补充说明 239

6.1 引言 239

6.2 非突变同质结 239

*6.2.1 线性缓变结 241

6.2.2 超突变结 243

6.3 半导体异质结 244

6.3.1 半导体-半导体异质结的能带图 244

6.3.2 界面态效应 251

*6.3.3 异质结晶格失配的效应 253

6.4 金属-半导体结 254

6.4.1 理想的金属-半导体结(电子亲和能模型) 254

6.4.2 界面诱导偶极层的影响 255

- 6.4.3 金属-半导体结的电流-电压特性 256
- 6.4.4 欧姆(低阻)接触 259
- 6.4.5 异质结二极管的 $I-V_a$ 特性 260
- *6.5 非理想结和异质结的电容 261
- 6.6 总结 261
- 6.7 阅读清单 261
- 6.8 参考文献 262
- 6.9 复习题 262
- 6.10 习题 262

第 2 部分补充内容:

二极管 266

- S2.1 引言 266
- S2.2 介电弛豫时间 266
 - S2.2.1 情况 1: 多子注入的介电弛豫时间 266
 - S2.2.2 情况 2: 少子注入的介电弛豫时间 268
- S2.3 结电容 269
 - S2.3.1 原型(突变)结的结电容 269
 - S2.3.2 非均匀掺杂结的结电容 270
 - S2.3.3 变容二极管 271
 - S2.3.4 短基区二极管的存储电荷电容 272
- S2.4 肖特基二极管的二阶效应 273
 - S2.4.1 肖特基势垒隧穿 275
 - S2.4.2 镜像效应导致的肖特基二极管的势垒降低 276
- S2.5 二极管的 SPICE 模型 278
 - S2.5.1 利用 SPICE 作示波器 278
 - S2.5.2 瞬态分析 280
- S2.6 总结 283
- S2.7 阅读清单 284

- S2.8 参考文献 284

- S2.9 习题 284

第 3 部分

场效应晶体管 287

第 7 章

MOSFET 296

- 7.1 引言 296
- 7.2 MOSFET(定性分析) 296
 - 7.2.1 MOS 电容介绍 296
 - 7.2.2 平衡状态的 MOSFET (定性分析) 300
 - 7.2.3 非平衡状态的 MOSFET (定性分析) 301
- 7.3 MOSFET(定量分析) 309
 - 7.3.1 迁移率为常数的长沟 MOSFET 模型 310
 - 7.3.2 更加实际的长沟模型: 电场对迁移率的影响 321
 - *7.3.3 串联电阻 333
- 7.4 模型和实验的比较 334
- 7.5 总结 335
- 7.6 阅读清单 336
- 7.7 参考文献 336
- 7.8 复习题 337
- 7.9 习题 337

第 8 章

FET 的补充分析 340

- 8.1 引言 340
- 8.2 阈值电压和低场迁移率的测量 340
- 8.3 亚阈值漏电流 342
- 8.4 互补 MOSFET(CMOS) 345
 - 8.4.1 反相器的工作原理 346
 - *8.4.2 CMOS 器件的匹配 347

- 8.5 CMOS反相器电路的开关过程 348
- 8.5.1 负载电容的影响 348
- 8.5.2 开关电路中的传播(栅)延迟 349
- 8.5.3 CMOS开关过程中的直通电流 351
- 8.6 MOSFET等效电路 352
- 8.6.1 小信号等效电路 353
- 8.6.2 CMOS放大器 356
- 8.7 单位电流增益截止频率 f_T 356
- *8.8 短沟道效应 357
- 8.8.1 有效沟道长度和 V_{DS} 的依赖关系 357
- 8.8.2 阈值电压和漏极电压的依赖关系 359
- 8.9 MOSFET按比例缩小 360
- 8.10 绝缘层上硅(SOI) 361
- 8.11 其他场效应晶体管 364
- *8.11.1 异质结场效应晶体管(HFET) 364
- 8.11.2 MESFET 366
- 8.11.3 结型场效应晶体管(JFET) 370
- 8.11.4 体沟道FET:定量分析 371
- 8.12 总结 373
- 8.13 阅读清单 374
- 8.14 参考文献 374
- 8.15 复习题 375
- 8.16 习题 375
- 第3部分补充内容:**
- 场效应晶体管 378**
- S3.1 引言 378
- S3.2 对沟道电荷 Q_{ch} 公式的说明 378
- S3.2.1 变化的耗尽层宽度对沟道电荷的影响 378
- S3.2.2 沟道电荷 Q_{ch} 与纵向电场 E_L 的依赖关系 380
- S3.3 MOSFET的阈值电压 381
- S3.3.1 固定电荷 383
- S3.3.2 界面陷阱电荷 383
- S3.3.3 体电荷 383
- S3.3.4 电荷对阈值电压的影响 384
- S3.3.5 平带电压 384
- S3.3.6 阈值电压的控制 387
- *S3.3.7 沟道量子效应 388
- S3.4 低场迁移率的普适关系式 390
- S3.5 V_T 的测量 392
- S3.6 确定长沟MOSFET的 V_T 和 μ_n 的另一种方法 394
- S3.7 MOS电容 396
- S3.7.1 理想MOS电容 396
- S3.7.2 实际MOS电容的 $C-V_C$ 关系曲线 400
- S3.7.3 根据 $C-V_C$ 测量进行参数分析 401
- *S3.8 MOS电容的混合图 402
- *S3.8.1 动态随机存储器(DRAM) 403
- *S3.8.2 电荷耦合器件(CCD) 406
- *S3.9 器件的退化 408
- *S3.10 MOSFET的低温工作特性 412
- *S3.11 MOSFET器件和电路的SPICE模拟 415
- S3.11.1 MOSFET的SPICE模拟举例 416
- S3.11.2 确定CMOS数字反相器的瞬态特性 419
- S3.12 总结 421
- S3.13 阅读清单 421
- S3.14 参考文献 421
- S3.15 复习题 422
- S3.16 习题 422

第 4 部分

双极结型晶体管 427

第 9 章

双极结型器件: 静电学特性 431

- 9.1 引言 431
- 9.2 输出特性(定性分析) 434
- 9.3 电流增益 436
- 9.4 原型 BJT 的模型 437
 - 9.4.1 收集系数 M 439
 - 9.4.2 注入效率 γ 440
 - 9.4.3 基区输运效率 α_T 441
- 9.5 双极晶体管中的掺杂梯度 445
 - 9.5.1 梯度基区晶体管 448
 - 9.5.2 基区电场对 β 的影响 451
- 9.6 基本 Ebers-Moll 直流模型 452
- 9.7 BJT 中的电流集边和基区电阻 454
- 9.8 基区宽度调制(Early 效应) 458
- 9.9 雪崩击穿 461
- 9.10 大注入 461
- 9.11 基区扩展(Kirk)效应 462
- 9.12 E - B 结内的复合 463
- 9.13 总结 464
- 9.14 阅读清单 465
- 9.15 参考文献 465
- 9.16 复习题 466
- 9.17 习题 466

第 10 章

双极晶体管的时变分析 471

- 10.1 引言 471
- 10.2 Ebers-Moll 交流模型 471
- 10.3 小信号等效电路 472
 - 10.3.1 混合 π 模型 474
- 10.4 双极晶体管的存储电荷电容 478
- 10.5 频率响应 481

- 10.5.1 单位电流增益频率 f_T 482
- 10.5.2 基区渡越时间 483
- 10.5.3 基区-集电区渡越时间 485
- 10.5.4 最高振荡频率 f_{max} 485

10.6 高频晶体管 485

- 10.6.1 双多晶 Si 自对准晶体管 485

10.7 双极开关晶体管 487

- 10.7.1 输出由低到高的转换时间 489
- 10.7.2 肖特基箝位晶体管 490
- 10.7.3 发射极耦合逻辑 490

10.8 BJT、MOSFET 和 BiMOS 493

- 10.8.1 BJT 和 MOSFET 的比较 493
- 10.8.2 BiMOS 494

10.9 总结 495

10.10 阅读清单 496

10.11 参考文献 496

10.12 复习题 496

10.13 习题 497

第 4 部分补充内容:

双极器件 499

- S4.1 引言 499
- S4.2 异质结双极晶体管(HBT) 499
 - S4.2.1 均匀掺杂 HBT 500
 - S4.2.2 组分渐变 HBT 502
- S4.3 Si 基区、SiGe 基区和 GaAs 基区 HBT 的比较 504
- S4.4 晶闸管(npnp 开关器件) 505
 - S4.4.1 四层二极管开关 505
 - S4.4.2 npnp 开关的双晶体管模型 508
- S4.5 可控硅整流器(SCRs) 509
- S4.6 CMOS 电路中的寄生 npnp 开关 511
- S4.7 SPICE 在 BJT 中的应用 512

- S4.7.1 寄生效应 514
- S4.7.2 小电流到中等电流区 514
- S4.7.3 大电流区 515
- S4.8 SPICE 在双极型晶体管中的应用
举例 516
- S4.9 总结 521
- S4.10 参考文献 521
- S4.11 复习题 522
- S4.12 习题 522

第 5 部分

光电器件 525

第 11 章

光电器件 526

- 11.1 引言 526
- 11.2 光电探测器 527
 - 11.2.1 一般光电探测器 527
 - *11.2.2 太阳能电池 532
 - 11.2.3 p-i-n(PIN)光电探测器 537
 - 11.2.4 雪崩光电二极管 538
- 11.3 发光二极管 539
 - 11.3.1 正偏结的自发辐射 539
 - *11.3.2 等电子陷阱 541
 - 11.3.3 蓝光 LEDs 和白光 LED 542
 - 11.3.4 红外 LED 542
- 11.4 激光二极管 547
 - 11.4.1 光增益 547
 - 11.4.2 反馈 549
 - 11.4.3 增益 + 反馈 = 激光器 551
 - 11.4.4 激光器的结构 552
 - 11.4.5 其他半导体激光器材料 555
- 11.5 图像传感器 556
 - 11.5.1 电荷耦合图像传感器 557
 - 11.5.2 MOS 图像传感器 558

- 11.6 总结 559
- 11.7 阅读清单 559
- 11.8 参考文献 559
- 11.9 复习题 560
- 11.10 习题 560

附录

附录 A 重要常数 564

附录 B 符号表 565

附录 C 制造 580

- C.1 引言 580
- C.2 衬底制备 580
 - C.2.1 原始材料 580
 - C.2.2 晶体(单晶)生长 581
 - C.2.3 缺陷 584
 - C.2.4 外延 585
- C.3 掺杂 588
 - C.3.1 扩散 588
 - C.3.2 离子注入 588
- C.4 光刻 590
- C.5 导体和绝缘体 592
 - C.5.1 金属化 592
 - C.5.2 多晶硅 593
 - C.5.3 氧化 593
 - C.5.4 氮化硅 595
- C.6 超净间 595
- C.7 封装 596
 - C.7.1 引线键合 596
 - C.7.2 引脚框架 597
 - C.7.3 倒装焊 598
 - C.7.4 表面贴装封装 598
- C.8 总结 599

附录 D 态密度函数, 态密度有效质量, 电导率有效质量 600

- D.1 引言 600
- D.2 一维自由电子 600
- D.3 二维自由电子 602

D.4 三维自由电子 603

D.5 周期性晶格中的准自由电子 604

D.6 态密度有效质量 604

D.6.1 情况1:导带在 $K=0$ 处具有
单一极小值 604

D.6.2 情况2:价带有两个子带,
都在 $K=0$ 处有极大值 E_V
604

D.6.3 情况3:导带在 $K=0$ 处具有
多个等效极小值(例如 Si、
Ge、GaP) 605

D.7 电导率有效质量 607

D.7.1 情况1:导带在 $K=0$ 处具有
单一极值 607

D.7.2 情况2:价带中的空穴 607

D.7.3 情况3:具有多个等效极小
值的导带中的电子 607

D.7.4 情况4:应变硅 608

D.8 对有效质量的常见结果的总结 609

附录 E 一些有用的积分公式 611

附录 F 有用的公式 612

附录 G 推荐阅读的文献 621

半导体材料

半导体构成了大多数现代电子系统(如计算机、通信网络、控制系统等)的基础。虽然在电子学领域也涉及其他材料的应用(例如,硬盘驱动器的磁性材料),本书还是主要介绍基于半导体的电子器件。

要了解半导体器件的工作原理和设计,首先要了解所用的材料。在本书第 1 部分,我们首先从原子中的电子出发,研究材料中电子的行为,然后研究半导体晶体中电子的行为。

我们将看到,经典力学不能给固体中电子的运动提供一个完整的图像。原则上,应该用量子力学代替经典力学来预测电子的行为,然而,量子力学的运用比我们熟悉的经典力学或牛顿力学要复杂得多。因此,本书将介绍准经典力学,对我们所熟悉的经典力学的方程进行修正,用来描述量子力学的效应。

在第 1 章中介绍对于理解半导体器件工作原理很重要的一些基本的量子力学概念(更完整的讨论放在第 4 章后面的补充内容 1A 中)。第 2 章介绍准经典力学,可以通过简单、直观的准经典方程预测复杂力场下电子的运动。

利用准经典力学,我们还可以画出能带图,并利用能带图分析电子的运动。能带图是理解和预测半导体中电子和空穴运动乃至电流必不可少的工具。

在第 3 章中我们将学习以下内容:半导体材料的电导率是由可以携带电流的荷电载流子数目决定的。半导体材料中携带电荷的载流子有电子和空穴两种。载流子的数目是由半导体材料中人为加入的杂质成分的浓度决定的。载流子浓度还和温度有关。如果有光照在样品上,载流子的浓度也会发生变化。

半导体中的电流由两部分组成:漂移电流和扩散电流。漂移电流是由电场引起的,而扩散电流是由载流子浓度随位置变化导致的。

第 4 章介绍非均匀半导体材料。非均匀半导体材料中,掺杂浓度或材料本身的成分是可以变化的。这些变化可以形成内建电场,提高器件的性能。大多数的现代半导体器件中都包含这样的非均匀材料构成的区域。

第 1 部分的补充内容介绍了与半导体材料相关的附加内容,其中包括关于量子力学的更详细的讨论、束缚态的电子的统计和声子等。

我们从原子中的电子开始第 1 部分内容的学习。