



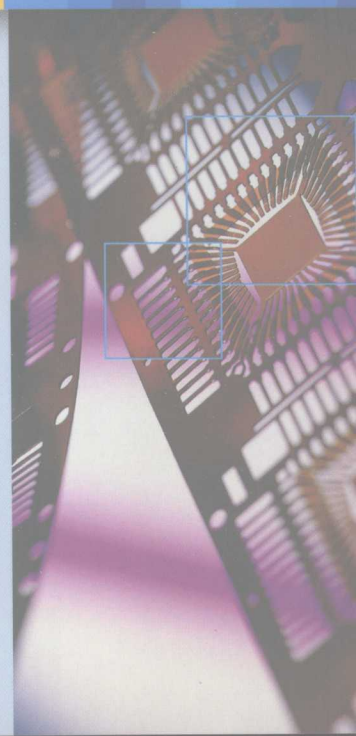
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电子科学与技术类特色专业系列规划教材

微电子器件与 IC设计基础 (第二版)

刘 刚 雷鑑铭 编著
高俊雄 陈 涛



科学出版社
www.sciencep.com



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

微电子器件与 IC 设计基础

(第二版)

刘 刚 雷鑑铭 编著
高俊雄 陈 涛

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要讲述微电子器件和集成电路的基础理论。内容包括:微电子器件物理基础;PN结;双极晶体管及MOSFET结构、工作原理和特性;JFET及MES-FET概要;集成电路基本概念及集成电路设计方法。共计7章。

本书可作为高等院校通信、计算机、自动化、光电等专业本科生学习微电子及IC方面知识的技术基础课教材。由于采用“积木式”结构,也可作为电子科学与技术及相关专业的本、专科高年级学生及研究生的专业课教材,又可作为从事微电子科学、电子器件、集成电路等工程研究和应用的有关人员的自学教材与参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微电子器件与IC设计基础 / 刘刚等编著. —2版. —北京:科学出版社,2009
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 978-7-03-025377-4

I. 微… II. 刘… III. ①微电子技术-电子元件-高等学校-教材②集成电路设计-高等学校-教材 IV. TN4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第149853号

责任编辑:贾瑞娜 / 责任校对:钟 洋
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>

涿海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年8月第 二 版 印张:20 1/2

2009年8月第四次印刷 字数:453 000

印数:8 501—12 500

定价:32.00 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:(按姓氏笔画为序)

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

第二版前言

《微电子器件与 IC 设计》一书自 2003 年出版发行以来,得到了广大读者的大力支持和广泛使用,在此表示衷心感谢!随着时光的推移,微电子领域的新技术、新理论硕果累累,应对飞速发展的形势,根据教学实践需要,修改并更新该教材一些较为陈旧的内容已势在必行。为此,我们编写了《微电子器件与 IC 设计基础》第一新教材,作为原书的第二版,奉献给广大读者。

本书的内容主要包括:微电子器件物理基础;PN 结;双极晶体管及 MOSFET 结构、工作原理和特性;JFET 及 MESFET 概要;集成电路的含义、类型、结构及工艺等基本概念,并重点论述了集成电路设计的软件、硬件及设计的方法与流程。共计 7 章。

本书主要供计算机、通信、自动化及光电等 IT 类专业的本科生及研究生使用。由于他们缺乏固体物理及半导体物理等理论物理基础,也不具备微电子器件方面的必要知识,我们特将有关的物理、器件及集成电路的理论、技术综合贯通,融为一体,使学生们在不多的学时内能较为全面系统地掌握 IC 设计的理论基础与方法,以满足他们对 IC 及其设计知识日益迫切的渴求。

微电子与集成电路是一门理论性和实践性都很强的学科,要完全掌握 IC 设计的技术需要多学科知识的综合运用。为了使读者对微电子器件的理论有一个初步的理解,我们较为系统地论述了微电子器件理论基础,并尽可能简化其繁杂的数学推导。在众多的电路设计软件与方法中,打破了双极、MOS 或模拟、数字的分类范畴,而以应用最为广泛的 CMOS 电路为对象,讲述了现代最新 EDA 软件的应用及版图设计,以期使本书具有“简明、易读、新颖、实用”的特点。事实证明,在笔者所了解的非微电子专业的学生中,由于学习了本书的课程,毕业后同样能较好地从事他们所喜爱的 IC 设计工作。

本书第 1 章由高俊雄老师编写;第 2 章由陈涛副教授编写;第 3、4、5 章及符号表等由刘刚教授编写;第 6、7 章由雷鑑铭副教授编写。本书由刘刚教授任主编,负责编写大纲的制定,全书结构、风格的协调及统稿、审阅等工作。

在编写过程中,我们参考了大量国内有关电子器件、晶体管原理、集成电路等方面的传统教材,同时也参考了国际上在该领域内的许多新教材,其中主要的文献资料已详细列于书后,但难免会有未顾及到的,在此一并表示衷心感谢。

在本书成书过程中,得到了多位同行、学生及家人的大力支持,限于篇幅,不能将他们的名字一一列举,谨此表示深深的谢意。

迫于时间仓促,书中疏漏及不妥之处在所难免,敬请广大读者一如既往地给予支持、鼓励和指正。

刘 刚

2009 年 7 月 12 日

第一版前言

21 世纪初,大学本科教育逐渐呈现“厚基础、宽口径”的新特点。电子信息科学技术也由昔日那种元器件与电路系统互相分割的局面走向相互融合的姿态,特别是大规模、超大规模集成电路的飞速发展与广泛应用,使电子、通信及计算机等领域在小型化、多功能化及智能化方面获得了全面推进,导致 FPGA,ASIC 等 IC 设计技术成了 IT 专业人才的必备知识及新的追求。顺应这一新趋势,我们向通信、自动化、光电子、计算机及电子科学与技术等专业的本科生开设了“微电子器件与 IC 设计”这一课程,以拓宽 IT 类学生在集成电路方面的基础理论知识,并且在多年教学实践的基础上,编写了这本《微电子器件与 IC 设计》教材。

该教材涵盖了半导体物理、双极晶体管、场效应晶体管、异质结器件、双极与 MOS 集成电路,以及微电子工艺等方面的基础理论。要真正掌握 IC 设计技术,必须对微电子器件的结构、工作原理及其特性有一定理解。本书不像微电子概论那么简约,也不像晶体管原理一类专业书那么深入;而是较为系统地论述了电子器件的物理基础,基本器件的结构原理、特性,以及集成电路的单元电路结构,IC 设计的方法、步骤,版图设计规则等知识;重在基本原理与方法的分析,同时兼顾传统与现代的不同理念,具有“简明、适中、新颖、实用”的特点。学生只要具有普通物理和电子电路基础,通过本书的学习,就能较为全面地了解与掌握集成电路设计的基本理论与方法。考虑到各专业学生知识背景不尽相同,学习能力与兴趣也相差甚远,教师在使用本书时可依据具体要求做出适当安排。对微电子学、电子科学与技术等专业学生,可主要讲授第 2~7 章有关器件方面的内容;对通信、光电子、自动化及计算机等专业学生,可重点讲授第 1、2、3、6 与第 8、9 章的基础内容。对于所有有志于 IC 设计的本科生及研究生,本书能为他们提供该领域内系统而广泛的基础理论与技术方面的知识。

本书由刘刚教授任主编,负责大纲的制订及全书的协调、统稿、审阅等工作,并编写了第 3、4、5、6、7 章及附录等内容;第 1、2 章由陈涛副教授编写,第 8、9 章由何笑明副教授编写。

在编写的过程中,我们参考了大量国内有关电子器件、晶体管原理、集成电路等方面的传统教材,同时也参考了国际上在该领域内的许多新教材,其中主要的文献资料已详细列于书后,但难免会有未顾及到的,在此一并表示衷心感谢。

在该教材成书过程中,得到了多位同行、学生及家人的大力支持,限于篇幅,不能将他们的名字一一列举,谨此表示深深的谢意。

迫于教务繁忙,时间仓促,书中疏漏乃至谬误之处在所难免,敬请广大读者不吝赐教。

刘 刚

2005 年 2 月 1 日于喻家山

符 号 表

A	PN 结面积	D_{pb}	基区空穴扩散系数
A_e	发射结面积	D_{nc}	集电区电子扩散系数
A_c	集电结面积	D_{pc}	集电区空穴扩散系数
a	线性缓变结杂质浓度梯度;冶金沟道半厚度;晶格常数	E	电场强度
BV_{EBO}	集电极开路时,发射极-基极击穿电压	E_b	基区内建电场
BV_{CBO}	发射极开路时,集电极-基极击穿电压	E_e	发射区内建电场
BV_{CEO}	基极开路时,集电极-发射极击穿电压	E_{bn}	大注入基区内建电场
BV_{DS}	漏源击穿电压	E_m	PN 结空间电荷区最高场强
BV_{GS}	栅源击穿电压	E_F	费米能级
b	沟道半厚度	E_{Fn}	电子准费米能级
C_T	PN 结势垒电容	E_{Fp}	空穴准费米能级
$C_T(0)$	零偏 PN 结势垒电容	E_i	本征能级
C_D	PN 结扩散电容	E_C	导带底能量
C_{TE}	发射结势垒电容	E_V	价带顶能量
C_{TC}	集电结势垒电容	E_g	禁带宽度
C_{DE}	发射极扩散电容	E_S	半导体表面电场强度
C_{DC}	集电极扩散电容	E_{sw}	功率-延迟积
C_{ox}	单位面积栅氧化层电容	f_T	特征频率
C_{GS}	栅源总电容	f_β	共发射极正向电流增益截止频率
C_G	栅极总电容	f_α	共基极正向电流增益截止频率
C_{ds}	漏源寄生电容	f_{gm}	跨导截止频率
C_{gs}	小信号栅源电容	f_M	最高振荡频率
C_{gd}	小信号栅漏电容	G_p	功率增益
C_{LT}	MOS 输出端对地总电容	G_v	电压增益
D_n	电子扩散系数	G_{pm}	最大功率增益
D_p	空穴扩散系数	G_0	冶金沟道电导
D_{ne}	发射区电子扩散系数	g_D	PN 结二极管电导
D_{pe}	发射区空穴扩散系数	g_i	输入电导
D_{nb}	基区电子扩散系数	g_o	输出电导
		g_μ	反馈电导
		g_m	跨导
		g_{ms}	饱和区跨导
		g_{mi}	线性区跨导

g_{mb}	衬底跨导	i_d	PN 结二极管小信号电流;漏极小信号电流
g_d	漏源电导	i_{ds}	漏源小信号电流
g_{ds}	饱和区漏源电导	i_E	发射极瞬态电流
h_{FE}	共发射极正向电流增益	i_e	发射极小信号电流
h	栅耗尽区厚度	i_B	基极瞬态电流
I_n	电子电流	i_b	基极小信号电流
I_p	空穴电流	i_C	集电极瞬态电流
I_D	PN 结二极管电流;漏极电流	i_c	集电极小信号电流
I_{DS}	MOSFET 漏源电流	J_n	电子电流密度
I_o	PN 结二极管饱和电流	J_p	空穴电流密度
I_F	PN 结二极管正向电流	J_{pe}	发射区空穴电流密度
I_R	PN 结二极管反向电流	J_{nb}	基区电子电流密度
I_E	发射极电流	J_{pc}	集电区空穴电流密度
I_B	基极电流	J_{pb}	基区空穴电流密度
I_b	瞬态基极电流	K	绝对温度; $I-V$ 特性系数
I_C	集电极电流	K_V	MOSFET 电压放大系数
I_{nb}	基区电子电流	k	玻尔兹曼常量;同比缩小系数
I_{nc}	集电结电子电流	L_{Di}	本征德拜长度
I_{ne}	发射区电子电流	L_{De}	非本征德拜长度
I_{pe}	发射区空穴电流	L_n	电子扩散长度
I_{pc}	集电区空穴电流	L_p	空穴扩散长度
I_{rb}	基区复合电流	L_{pe}	发射区空穴扩散长度
I_{re}	发射结势垒复合电流	L_{pc}	集电区空穴扩散长度
I_{rg}	势垒反向产生电流	L_{nb}	基区电子扩散长度
I_{rd}	反向扩散电流	L_E	发射极总周长
I_s	双极晶体管表面漏电流	l_e	发射极条长
I_{sb}	基区表面漏电流	l_{eff}	发射极有效条长
I_{EBO}	集电极开路时,发射极-基极反向电流	L_e	发射极引线电感
I_{CBO}	发射极开路时,集电极-基极反向电流	L_b	基极引线电感
I_{CEO}	基极开路时,集电极-发射极反向电流	L	沟道长度
I_{CM}	集电极最大电流	L_{eff}	有效沟道长度
I_{CS}	集电极饱和电流	M	倍增系数
I_{BS}	临界饱和基极电流	N	N 型区
I_{BX}	过驱动基极电流	N_C	导带底有效态密度,集电区杂质浓度
I_G	栅极电流	N_V	价带顶有效态密度
I_{DSat}	饱和漏极电流	N_D	施主杂质浓度
I_{DSS}	最大饱和漏极电流	N_A	受主杂质浓度
I_{DSub}	亚阈值电流	N_B	基区杂质浓度
i_D	PN 结二极管瞬态电流;漏极瞬态电流	N_{BC}	衬底杂质浓度

N_E	发射区杂质浓度	Q_n	单位面积表面反型层电子电荷
N_S	扩散杂质表面浓度	Q_{nT}	沟道总电子电荷
N_{ES}	发射区扩散杂质表面浓度	Q_C	JFET 沟道载流子电荷
N_{BS}	基区扩散杂质表面浓度	q	电子电量
n	电子密度	$R_{\square b}$	内基区方块电阻
n_i	本征载流子密度	$R_{\square B}$	外基区方块电阻
n_{ie}	有效本征载流子密度	$R_{\square e}$	发射区方块电阻
n_{e0}	发射区热平衡电子密度	r_b	基极电阻
n_{n0}	N 型区热平衡电子密度	r_{b1}	内基区电阻
n_{p0}	P 型区热平衡电子密度	r_{b2}	外基区电阻
n_{b0}	基区热平衡电子密度	r_{bc}	基极接触电阻
n_{c0}	集电区热平衡电子密度	r_{cs}	集电极串联电阻
n_p	P 型区非平衡电子密度	r_e	发射结电阻
n_e	发射区非平衡电子密度	r_{es}	发射极串联电阻
n_b	基区非平衡电子密度	R_D	漏极串联电阻
n_c	集电区非平衡电子密度	R_G	栅极串联电阻
P	P 型区	R_{on}	沟道导通电阻
p	空穴密度	R_S	源极串联电阻
p_{p0}	P 型区热平衡空穴密度	S	表面复合速率; 饱和深度; 栅电压摆幅
p_{e0}	发射区热平衡空穴密度	S_e	发射极条宽
p_e	发射区非平衡空穴密度	S_b	基极接触条宽
p_{b0}	基区热平衡空穴密度	S_{eb}	发射结边缘-基极接触边缘距离
p_b	基区非平衡空穴密度	t_d	延迟时间
p_c	集电区非平衡空穴密度	t_{dn}	MOSFET 导通延迟时间
p_{c0}	集电区热平衡空穴密度	t_{df}	MOSFET 关断延迟时间
Q_N	PN 结中性 N 区过剩载流子电荷	t_r	上升时间
Q_P	PN 结中性 P 区过剩载流子电荷	t_s	储存时间
Q_D	PN 结中性扩散区过剩载流子电荷; JFET 栅 PN 结 N 区耗尽层离化施 主电荷	t_f	下降时间
Q_E	发射区非平衡载流子总电荷	t_{on}	开启时间
Q_B	基区非平衡载流子总电荷, MOS 单位 面积表面耗尽区电荷	t_{off}	关断时间
Q_{BS}	基区超量储存电荷	t_{ox}	二氧化硅层厚度
Q_{CS}	集电压超量储存电荷	t_{ch}	MOST 沟道渡越时间
Q_X	超量储存电荷	t_{tr}	MOST 总渡越时间
Q_G	单位面积栅电荷	U	电子-空穴净复合率
Q_{GT}	栅极总电荷	V_D	PN 结内建电势或接触电势差
Q_{BM}	单位面积最大表面耗尽区电荷	V_{DE}	发射结内建电势
Q_{ox}	单位面积二氧化硅层电荷	V_{DC}	集电结内建电势
		V_A	PN 结二极管外加电压
		V_{EA}	Early 电压
		V_F	PN 结二极管正向电压

V_R	PN 结二极管反向电压	W_N	PN 结二极管中性 N 区宽度
V_{Dn}	异质结空间电荷区净掺杂 N 型部分内建电势差	W_P	PN 结二极管中性 P 区宽度
V_n	外加电压在异质结空间电荷区 N 型部分压降	x_m	PN 结空间电荷区宽度
V_{Dp}	异质结空间电荷区净掺杂 P 型部分内建电势差	x_j	结深
V_P	外加电压在异质结空间电荷区 P 型部分压降	x_{je}	发射结深度
V_J	外加在 PN 结空间电荷区上的电压	x_{jc}	集电结深度
V_t	热电势	α_0	共基极直流及低频电流增益
V_B	PN 结雪崩击穿电压	α	共基极高频电流增益
V_{BE}	基极-发射极电压	α_F	共基极正向电流增益
V_{CB}	集电极-基极电压	α_R	共基极反向电流增益
V_{CE}	集电极-发射极电压	α_n	电子电离率
V_E	发射结外加电压	α_p	空穴电离率
V_C	集电结外加电压	β_0	共发射极直流及低频电流增益
V_{PT}	穿通电压	β	共发射极高频电流增益
V_{CES}	饱和压降		MOSFET 增益因子
V_{GS}	栅源电压	β^*	基区输运系数
V_{DS}	漏源电压	β_F	共发射极正向电流增益
V_{BS}	衬源电压	β_R	共发射极反向电流增益
V_T	阈电压	β_S	临界饱和共发射极电流增益
V_{TN}	N 沟道阈电压	γ_0	发射结直流发射效率
V_{TP}	P 沟道阈电压	γ	发射结交流发射效率
V_{DSat}	饱和漏源电压		MOSFET 衬偏调制系数
V_S	表面势	Δp_n	N 区过剩空穴密度
V_{FB}	平带电压	Δn_p	P 区过剩电子密度
V_{OX}	二氧化硅层电压降	ΔE_g	禁带变窄量
V_{on}	导通电压	ϵ_0	绝对介电常数
V_P	夹断电压	ϵ_s	硅相对介电常数
v_{sl}	载流子极限漂移速度	ϵ_{ox}	二氧化硅相对介电常数
W	沟道宽度	η	基区电场因子
W_b	有效基区宽度	λ	沟道长度调制系数
W_{b0}	冶金基区宽度	μ_n	电子迁移率
W_c	集电区宽度	μ_p	空穴迁移率
W_{cib}	电流感应基区宽度	μ_{ne}	发射区电子迁移率
W_{eff}	有效沟道宽度	μ_{pe}	发射区空穴迁移率
W_e	中性发射区宽度	μ_{nb}	基区电子迁移率
W_{epi}	外延层厚度	μ_{pb}	基区空穴迁移率
		μ_{nc}	集电区电子迁移率
		μ_{pc}	集电区空穴迁移率
		μ_{eff}	有效迁移率
		μ_s	低场表面迁移率

ρ	电阻率	τ_E	发射极时间常数
σ_n	电子电导率	τ_e	发射极延迟时间
σ_p	空穴电导率	τ_C	集电极时间常数
τ_n	电子寿命	τ_c	集电结延迟时间
τ_p	空穴寿命	τ_d	集电结空间电荷区渡越时间
τ_{nb}	基区电子寿命	τ_t	JFET 小信号延迟时间
τ_{pe}	发射区空穴寿命	$q\phi_{ms}$	金属半导体功函数差
τ_{pc}	集电区空穴寿命	$q\phi_m$	金属功函数
τ_{ne}	发射区电子寿命	$q\phi_s$	半导体功函数
τ_s	晶体管饱和时间常数	ϕ_{sb}	肖特基势垒接触势
τ_S	SHR 寿命	χ	电子亲和势
τ_A	Auger 寿命	φ_F	费米势
τ_B	基极时间常数	φ_{FP}	P 型材料费米势
τ_b	基区渡越时间	φ_{FN}	N 型材料费米势

目 录

第二版前言

第一版前言

符号表

第 1 章 半导体物理基础	1
1.1 半导体材料	1
1.1.1 半导体材料的原子构成	1
1.1.2 半导体材料的晶体结构	2
1.2 半导体中的电子	3
1.2.1 量子力学简介	4
1.2.2 半导体中电子的特性与能带	7
1.2.3 载流子	10
1.3 热平衡状态下载流子的浓度.....	12
1.3.1 电子的统计分布规律	13
1.3.2 载流子浓度与费米能级的关系	14
1.3.3 本征半导体与杂质半导体.....	15
1.4 载流子的输运.....	20
1.4.1 载流子的散射	20
1.4.2 载流子的漂移运动与迁移率	20
1.4.3 漂移电流与电导率	23
1.4.4 扩散运动与扩散系数	24
1.4.5 电流密度方程与爱因斯坦关系式	25
1.5 非平衡载流子.....	26
1.5.1 非平衡载流子的复合与寿命	26
1.5.2 准费米能级	28
1.6 连续性方程与扩散方程.....	29
1.6.1 连续性方程	29
1.6.2 扩散方程	29
思考题 1	31
习题 1	31
第 2 章 PN 结	33
2.1 平衡 PN 结能带图及空间电荷区	33
2.1.1 平衡 PN 结能带图	33
2.1.2 PN 结的形成过程	36
2.1.3 平衡 PN 结的载流子浓度分布	36
2.2 理想 PN 结的伏安特性	38

2.2.1	PN 结的正向特性	38
2.2.2	PN 结的反向特性	40
2.2.3	理想 PN 结的伏安特性	41
2.3	实际 PN 结的特性	44
2.3.1	PN 结空间电荷区中的复合电流	44
2.3.2	PN 结空间电荷区中的产生电流	47
2.3.3	PN 结表面漏电流与表面复合、产生电流	48
2.3.4	PN 结的温度特性	50
2.4	PN 结的击穿	51
2.4.1	PN 结空间电荷区中的电场	51
2.4.2	PN 结的雪崩击穿和隧道击穿	53
2.5	PN 结的电容	55
2.5.1	PN 结的势垒电容	55
2.5.2	PN 结的扩散电容	56
	思考题 2	58
	习题 2	58
第 3 章	双极晶体管	60
3.1	双极晶体管的结构	60
3.1.1	基本结构	60
3.1.2	晶体管的杂质分布	61
3.1.3	晶体的实际结构	62
3.1.4	晶体管的结构特点	63
3.1.5	集成电路中的晶体管	64
3.2	双极晶体管的放大原理	65
3.2.1	晶体管直流短路电流放大系数	65
3.2.2	晶体管内载流子的传输	66
3.2.3	发射效率和基区输运系数	67
3.2.4	共基极直流电流放大系数 α_0	68
3.2.5	共射极直流电流放大系数 β_0	69
3.3	双极晶体管电流增益	69
3.3.1	均匀基区晶体管直流电流增益	69
3.3.2	缓变基区晶体管直流电流增益	76
3.3.3	影响电流放大系数的因素	80
3.3.4	大电流下晶体管放大系数的下降	86
3.4	双极晶体管常用直流参数	90
3.4.1	反向截止电流	91
3.4.2	击穿电压	92
3.4.3	集电极最大电流	94
3.4.4	基极电阻	94
3.5	双极晶体管直流伏安特性	96

3.5.1	均匀基区晶体管直流伏安特性	96
3.5.2	双极晶体管的特性曲线	98
3.5.3	Ebers-Moll 模型	101
3.6	交流小信号电流增益及频率特性参数	104
3.6.1	交流小信号电流传输	104
3.6.2	BJT 交流小信号模型	105
3.6.3	交流小信号传输延迟时间	108
3.6.4	交流小信号电流增益	111
3.6.5	频率特性参数	113
3.7	双极晶体管的开关特性	116
3.7.1	晶体管的开关作用	117
3.7.2	正向压降和饱和压降	119
3.7.3	晶体管的开关过程	119
3.7.4	双极晶体管的开关时间	121
	思考题 3	128
	习题 3	128
第 4 章	结型场效应晶体管	130
4.1	JFET 结构与工作原理	131
4.1.1	PNJFET 基本结构	131
4.1.2	JFET 工作原理	132
4.1.3	JFET 特性曲线	134
4.1.4	夹断电压及饱和漏源电压	135
4.2	MESFET	136
4.2.1	金属与半导体接触	136
4.2.2	MESFET 基本结构	138
4.2.3	MESFET 工作原理	138
4.3	JFET 直流特性	139
4.4	直流特性的非理想效应	141
4.4.1	沟道长度调制效应	141
4.4.2	速度饱和效应	142
4.4.3	亚阈值电流	143
4.5	JFET 的交流小信号特性	143
4.5.1	JFET 的低频交流小信号参数	143
4.5.2	JFET 本征电容	145
4.5.3	交流小信号等效电路	146
4.5.4	JFET 的频率参数	147
	思考题 4	149
	习题 4	149
第 5 章	MOSFET	150
5.1	MOS 结构及其特性	150

5.2	MOSFET 的结构及工作原理	153
5.2.1	MOSFET 基本结构	153
5.2.2	MOSFET 基本类型	154
5.2.3	MOSFET 基本工作原理	155
5.2.4	MOSFET 转移特性	156
5.2.5	MOSFET 输出特性	157
5.3	MOSFET 的阈值电压	158
5.3.1	阈值电压的含义	158
5.3.2	平带电压	158
5.3.3	实际 MOS 结构的电荷分布	159
5.3.4	阈值电压表示式	160
5.3.5	$V_{BS} \neq 0$ 时的阈值电压	160
5.3.6	影响阈值电压的因素	161
5.4	MOSFET 直流特性	164
5.4.1	萨支唐方程	164
5.4.2	影响直流特性的因素	168
5.4.3	击穿特性	172
5.4.4	亚阈特性	176
5.5	MOSFET 小信号特性	178
5.5.1	交流小信号参数	178
5.5.2	本征电容	180
5.5.3	交流小信号等效电路	182
5.5.4	截止频率	183
5.6	MOSFET 开关特性	185
5.6.1	开关原理	185
5.6.2	开关时间	187
5.7	短沟道效应及按比例缩小规则	188
5.7.1	短沟道效应的含义	188
5.7.2	短沟道对阈值电压的影响	189
5.7.3	窄沟道对阈值电压的影响	191
5.7.4	按比例缩小规则	192
	思考题 5	194
	习题 5	195
第 6 章	集成电路概论	196
6.1	什么是集成电路	196
6.2	集成电路的发展历史	196
6.3	集成电路相关产业及发展概况	197
6.4	集成电路分类	198
6.5	集成电路工艺概述	199
6.5.1	外延生长	199

6.5.2	氧化	200
6.5.3	掺杂	200
6.5.4	光刻	200
6.5.5	刻蚀	201
6.5.6	淀积	201
6.5.7	钝化	201
6.6	CMOS 工艺中的无源器件及版图	201
6.6.1	电阻	202
6.6.2	电容	203
6.6.3	电感	205
6.7	CMOS 工艺中的有源器件及版图	207
6.7.1	NMOS	207
6.7.2	PMOS	208
6.7.3	NPN	209
6.7.4	PNP	210
6.8	CMOS 反相器	212
6.8.1	CMOS 反相器的直流特性	212
6.8.2	CMOS 反相器的瞬态特性	216
6.8.3	CMOS 反相器的功耗与设计	220
6.8.4	CMOS 反相器的制作工艺及版图	221
6.9	CMOS 传输门	223
6.9.1	NMOS 传输门的特性	224
6.9.2	PMOS 传输门的特性	225
6.9.3	CMOS 传输门的特性	225
6.10	CMOS 放大器	228
6.10.1	共源放大器	228
6.10.2	源极跟随器	235
6.10.3	共栅放大器	237
	思考题 6	239
	习题 6	239
第 7 章	集成电路设计基础	241
7.1	模拟集成电路设计概述	241
7.2	模拟集成电路的设计流程及 EDA	242
7.2.1	模拟集成电路设计一般流程	242
7.2.2	模拟集成电路设计相关 EDA	245
7.2.3	模拟集成电路设计实例	246
7.3	数字集成电路设计流程及 EDA	265
7.3.1	数字集成电路设计一般流程	266
7.3.2	数字集成电路设计相关 EDA	267
7.3.3	Verilog HDL 及数字电路设计	267

7.4 集成电路版图设计	279
7.4.1 集成电路版图设计基本理论	280
7.4.2 版图设计的方式	280
7.4.3 半定制数字集成电路版图设计	283
7.4.4 全定制模拟集成电路版图设计	287
思考题 7	297
习题 7	297
参考文献	299
附录	301
附录 A 硅电阻率与杂质浓度关系	301
附录 B 硅中载流子迁移率与杂质浓度关系	301
附录 C Si 和 GaAs 在 300K 的性质	302
附录 D 常用元素、二元及三元半导体性质	303
附录 E 常用物理常数	304
附录 F 国际单位制(SI 单位)	305
附录 G 单位词头	305