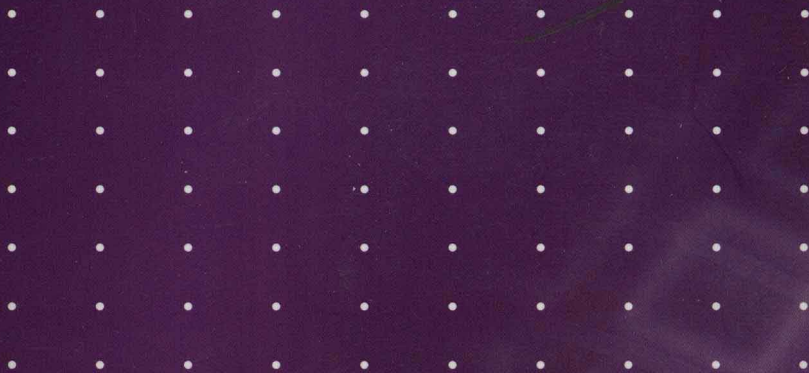


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

模拟电子技术基础

■ 李国丽 主 编

■ 李国丽 王 涌 李如春 编



序

自1999年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。

2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过2~3年的试用,形成适用于本层次教学的教材。

3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。

4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010年12月

前 言

本教材紧跟电子技术的发展趋势,根据新世纪人才培养的需要,参照教育部电子电气基础课程教学指导分委员会修订的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求,在“先器件后电路,先小信号后大信号,先基础后应用”的体系下安排教材内容,对模拟电子技术的基本概念、基本电路和基本方法给予系统、精炼的叙述,使读者从中受益。

教材由半导体器件基础、放大电路基础和集成电路基础三篇构成:

第一篇,半导体器件基础:介绍二极管、晶体管、场效应管等半导体器件的基础知识,重点介绍器件的外部特征,强调器件的外部特性曲线、外部电压电流关系和外部特征参数等。

第二篇,放大电路基础:从工程实际应用的需要出发,利用前续“电路理论”课程中的相关定理,对晶体管、场效应管构成的各种基本放大电路的性能指标进行近似估算,分析各种电路的特点。

第三篇,集成电路基础:对集成运放的构成、信号的处理与产生、直流电源等内容进行分析,强调运放的工程应用。

教材编写过程中,针对电路形式多、公式多的特点,注重归纳与小结,将一些具有规律的内容予以提炼,使读者在内容的掌握上能得到帮助。

教材各章节以例题、自我检测题、习题的形式帮助读者理解课程内容,例题注重对理论内容的加深理解,自我检测题在基本概念上帮助读者消化吸收,习题则加强工程估算能力的培养。

教材还利用 Multisim 仿真结果演示验证工程近似估算的可行性,实现经典内容与 EDA 技术的有机融合,使教材具有系统性、科学性、启发性、先进性、实用性的特点。

本书由李国丽、王涌、李如春编写,其中,第 1~4、7、8 章由李国丽编写,第 5、6 章由李如春编写,第 9~11 章由王涌编写,李国丽负责统稿。清华大学华成英教授、华中科技大学彭容修教授对书稿进行了认真仔细的审阅,并提出了很多宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢!在本书的编写过程中,参考和引用了有关专家的教材,在此一并表示谢意!

本书中标有“*”章节为选读内容。

由于编者的水平有限,书中难免存在不妥之处,欢迎读者批评指正。

编者

2012 年 1 月

本教材各章符号表

1 半导体二极管

n_i 本征激发的自由电子浓度	C_d 极间电容
p_i 本征激发的空穴浓度	D 二极管
n 掺杂后的电子浓度	i_D 流过二极管的电流
p 掺杂后的空穴浓度	v_D 二极管外加的电压
E_{PN} PN 结内电场	V_{th} 死区电压(或门坎电压)
d PN 结的厚度	I_F 二极管最大整流电流
V_0 接触电位差	C_d 极间电容
I_S 反向饱和电流	f_M 二极管最高工作频率
V_T 温度的电压当量	D_Z 稳压管
V_{BR} PN 结反向击穿电压	V_Z 稳压管稳定电压
V_R PN 结反偏置电压	I_Z 稳压管稳定电流
I_R PN 结反向电流	P_{Zm} 稳压管额定功耗
C_D PN 结扩散电容	r_Z 稳压管动态电阻
C_B PN 结势垒电容	αV_Z 稳压管温度系数

2 晶体管

BJT 晶体管	P_{CM} 晶体管集电极最大允许耗散功率
e 晶体管发射极	$V_{\text{BR(CBO)}}$ 晶体管发射极开路时,集电极 - 基极之间的反向击穿电压
b 晶体管基极	$V_{\text{BR(EBO)}}$ 晶体管集电极开路时,发射极 - 基极之间的反向击穿电压
c 晶体管集电极	$V_{\text{BR(CEO)}}$ 晶体管基极开路时,集电极 - 发射极之间的反向击穿电压
α 晶体管共基极直流电流放大系数	V_P 场效应管夹断电压
α 晶体管的共基极交流电流放大系数	I_{DSS} 场效应管的饱和漏极电流
β 晶体管的共射极直流电流放大系数	V_T 场效应管开启电压
β 晶体管的共射极交流电流放大系数	I_{D0} 绝缘栅场效应管 $v_{\text{CS}} = 2V_T$ 时的漏极电
I_{CBO} 晶体管集电极 - 基极反向饱和电流	
I_{CEO} 晶体管集电极 - 发射极反向穿透电流	
I_{CM} 晶体管集电极最大允许电流	

流	C_{GS} 场效应管的栅 - 源极间电容
K_N N 沟道器件的电导常数	C_{GD} 场效应管的栅 - 漏极间电容
W/L 沟道的宽长比	C_{DS} 场效应管的漏 - 源极间电容
R_{GS} 场效应管的直流输入电阻 (栅 - 源电阻)	I_{DM} 场效应管的漏极最大允许电流
r_{DS} 场效应管的输出电阻 (漏 - 源电阻)	P_{DM} 场效应管的漏极最大允许耗散功率
g_M 场效应管的低频互导	$V_{(BR)DS}$ 漏源击穿电压
	$V_{(BR)GS}$ 栅源击穿电压

3 模拟电子系统的基本问题

v_s 理想电压源	\dot{A}_i 电流放大倍数
i_s 理想电流源	\dot{A}_g 互导放大倍数
R_s 信号源内阻	\dot{A}_r 互阻放大倍数
V_D 二极管恒压降模型的管压降	R_i 放大电路的输入电阻
r_D 二极管折线模型的正向电阻	R_o 放大电路的输出电阻
r_d 二极管的微变动态电阻	
\dot{A}_v 电压放大倍数	
\dot{A}_{vs} 电源电压放大倍数	

4 基本放大电路

V_{BB} 基极偏置电源	r_{be} 晶体管的微变输入电阻
V_{CC} 集电极偏置电源	r_{ce} 晶体管的微变输出电阻
Q 静态工作点	$r_{bb'}$ 晶体管基区体电阻
V_{CES} 晶体管的饱和管压降	$r_{b'e}$ 晶体管发射结电阻
C_{b1} 、 C_{b2} 、 C_1 、 C_2 耦合电容	r_{ds} 场效应管微变输出电阻
C_s 、 C_e 旁路电容	

5 放大电路的频率响应

$ A_{v(f)} $ 幅频响应, 也称幅频特性	f_T 晶体管的特征频率
$\varphi(f)$ 相频响应, 也称相频特性	f_α 晶体管的共基极截止频率
f_L 下限频率	$C_{b'e}$ 发射结的结电容
f_H 上限频率	$C_{b'c}$ 集电结的结电容
BW 通频带或带宽	g_m 晶体管的跨导或互导
f_β 晶体管的共射极截止频率	C_M 密勒电容

\dot{A}_{vsM} 放大电路在中频区的电源电压放大倍数

φ_M 放大电路在中频区的输出电压与输入电压的相移

6 功率放大电路

η 功率放大电路的转换效率

P_V 直流电源提供的平均功率

P_o 输出功率

P_{Vmax} 直流电源提供的平均功率的最大值

P_{omax} 最大输出功率

P_T 功放管的总管耗

7 模拟集成电路

I_{REF} 基准电流

V_{op-p} 集成运放最大输出电压

v_{id} 差模信号

V_{idmax} 集成运放最大差模输入电压

v_{ic} 共模信号

V_{icmax} 集成运放最大共模输入电压

\dot{A}_{vd} 差模放大倍数

V_{I0} 集成运放输入失调电压

\dot{A}_{vc} 共模放大倍数

I_{IB} 集成运放输入偏置电流

K_{CMR} 共模抑制比

I_{I0} 集成运放输入失调电流

R_{id} 差模输入电阻

dV_{I0}/dT 集成运放输入失调电压温漂

R_{ic} 共模输入电阻

dI_{I0}/dT 集成运放输入失调电流温漂

\dot{A}_{od} 集成运放开环差模电压放大倍数

SR 集成运放转换速率

8 负反馈放大电路

x_i 输入信号

\dot{A}_f 闭环增益

x_f 反馈信号

$\dot{A} \dot{F}$ 环路增益

x_o 输出信号

R_{if} 闭环输入电阻

x_{id} 净输入信号

R_{of} 闭环输出电阻

\dot{A} 开环增益

G_m 增益裕度

\dot{F} 反馈网络的反馈系数

φ_m 相位裕度

9 信号的运算和处理

v_p 运放同相输入端电压

R_p 平衡电阻

v_n 运放反相输入端电压

LPF 低通滤波器

i_p 运放同相输入端电流

HPF 高通滤波器

i_n 运放反相输入端电流

BPF 带通滤波器

BEF 带阻滤波器

$|A_{vP}| = A_{vP}$ 通带电压放大倍数

f_p 截止频率

ω_0 低通和高通滤波器的特征角频率,带

通滤波器的通带中心角频率,带阻滤波器的阻带中心角频率

f_0 特征频率

Q 等效品质因数

10 信号产生电路

f_0 振荡频率

f_s 石英晶体串联谐振频率

f_p 石英晶体并联谐振频率

V_T 单门限电压比较器的阈值电压(或称

转折电压、门限电平)

V_{T-} 、 V_{T+} 滞回比较器的阈值电压

V_{T1} 、 V_{T2} 窗口比较器的阈值电压

T 振荡周期

11 直流电源

v_2 变压器二次电压

V_2 变压器二次电压有效值

I_2 变压器二次电流有效值

$V_{O(AV)}$ 桥式整流电路输出电压平均值

$I_{O(AV)}$ 输出电流平均值

$I_{D(AV)}$ 流过二极管的平均电流

V_{RM} 整流电路中截止的二极管所承受的最大反向电压

θ 整流二极管的导通角

$V_{O(AV)}$ 输出电压的平均值

K_V 输入调整因数

S_V 电压调整率

S_r 稳压系数

S_I 电流调整率

S_T 温度系数

\tilde{V}_O 纹波电压

V_I 稳压电路输入电压

V_O 稳压电路输出电压

目 录

第一篇 半导体器件基础

1 半导体二极管	1	2 晶体管	24
1.1 半导体的基本知识	1	2.1 BJT	24
1.1.1 半导体的共价键结构	1	2.1.1 BJT 结构简介	24
1.1.2 本征半导体及其本征激发	2	2.1.2 放大状态下载流子的传输过程及 电流分配关系	25
1.1.3 杂质半导体	3	2.1.3 晶体管共射接法时的伏安特性	28
1.2 PN 结的形成及特性	4	2.1.4 晶体管的主要参数	31
1.2.1 载流子的扩散及漂移	5	2.2 结型场效应管	33
1.2.2 PN 结的单向导电性	6	2.2.1 结型场效应管的结构	33
1.2.3 PN 结的伏安特性	7	2.2.2 结型场效应管的工作原理	34
1.2.4 PN 结的反向击穿	8	2.2.3 结型场效应管的特性曲线	36
1.2.5 PN 结的电容效应	9	2.3 金属-氧化物-半导体场效应管	37
1.3 二极管	10	2.3.1 N 沟道增强型 MOSFET 的结构	38
1.3.1 二极管的结构	10	2.3.2 N 沟道增强型 MOSFET 的工作 原理	38
1.3.2 二极管的伏安特性	11	2.3.3 N 沟道增强型 MOSFET 的特性 曲线	40
1.3.3 二极管的主要参数	12	2.3.4 N 沟道耗尽型 MOSFET	40
1.4 二极管电路例题	12	2.3.5 P 沟道 MOSFET	41
1.5 特殊二极管	16	2.4 场效应管的主要参数	42
1.5.1 稳压管	16	2.4.1 直流参数	42
1.5.2 发光二极管	17	2.4.2 交流参数	43
1.5.3 光电二极管	17	2.4.3 极限参数	43
1.5.4 光电耦合器件	17	本章小结	44
1.5.5 肖特基二极管	18	自我检测题	44
1.5.6 变容二极管	18	习题	47
本章小结	18		
自我检测题	19		
习题	20		

第二篇 放大电路基础

3 模拟电子系统的基本问题	49	3.1 电信号	49
----------------------------	----	---------------	----

3.1.1 电信号的戴维宁等效和诺顿等效	49	自我检测题	128
3.1.2 模拟信号和数字信号	50	习题	133
3.2 模拟电子系统的基本分析方法	50	5 放大电路的频率响应	146
3.2.1 模拟电子系统的基本构成	50	5.1 频率响应的基本概念	146
3.2.2 模拟电子系统的图解分析法	51	5.1.1 频率响应和通频带	146
3.2.3 模拟电子系统的简化模型分析法	52	5.1.2 幅度失真与相位失真	148
3.3 放大电路	59	5.2 基本 RC 电路的频率响应	148
3.3.1 放大电路模型	59	5.2.1 RC 低通电路的频率响应	149
3.3.2 放大电路的主要性能指标	60	5.2.2 RC 高通电路的频率响应	151
本章小结	63	5.3 晶体管的频率参数及其高频小信号模型	152
自我检测题	64	5.3.1 晶体管的频率参数	152
习题	65	5.3.2 晶体管的高频小信号模型	153
4 基本放大电路	67	5.4 共射极放大电路的频率响应	155
4.1 基本共射极放大电路	67	5.4.1 共射极放大电路的高频响应	155
4.1.1 电路组成与工作原理	67	5.4.2 共射极放大电路的低频响应	161
4.1.2 共射极放大电路的图解分析法	69	5.5 共基极放大电路的高频响应	169
4.1.3 放大电路的简化模型分析法	81	5.6 场效应管放大电路的高频响应	172
4.2 放大电路的静态工作点稳定问题	91	5.7 多级放大电路的频率响应	173
4.2.1 温度对静态工作点的影响	91	本章小结	174
4.2.2 射极偏置电路	92	自我检测题	175
4.3 共集和共基放大电路	98	习题	176
4.3.1 共集放大电路	98	6 功率放大电路	179
4.3.2 共基放大电路	103	6.1 功率放大电路的一般问题	179
4.3.3 三种组态放大电路的性能比较	105	6.1.1 功率放大电路的特点	179
4.4 场效应管放大电路	108	6.1.2 功率放大电路提高效率的主要途径	180
4.4.1 场效应管放大电路的静态分析	108	6.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	181
4.4.2 场效应管的微变等效模型	109	6.2.1 电路组成	181
4.4.3 共源极放大电路	110	6.2.2 电路分析	182
4.4.4 共漏极放大电路	114	6.2.3 功放管的选择	185
4.4.5 共栅极放大电路	115	6.3 甲乙类互补对称功率放大电路	188
4.5 多级放大电路	119	6.3.1 乙类功率放大电路的交越失真问题	188
4.5.1 多级放大电路的构成与耦合方式	119	6.3.2 甲乙类双电源互补对称功率放大电路	189
4.5.2 多级放大电路的动态分析	120	6.3.3 甲乙类单电源互补对称功率放大电路	191
4.5.3 几种组合放大电路	122		
本章小结	127		

6.4 场效应管功率放大电路	193	自我检测题	194
本章小结	194	习题	195
第三篇 集成电路基础			
7 模拟集成电路	199	8.2 负反馈放大电路的四种基本组态	249
7.1 模拟集成电路的直流偏置技术	199	8.2.1 电压串联负反馈	249
7.1.1 各种电流源	200	8.2.2 电压并联负反馈	250
7.1.2 以电流源为有源负载的放大 电路	206	8.2.3 电流串联负反馈	251
7.2 差分放大电路	207	8.2.4 电流并联负反馈	251
7.2.1 直接耦合多级放大电路的零点 漂移现象	207	8.3 负反馈放大电路的方框图及增益的 一般表达式	253
7.2.2 差分式放大电路	208	8.3.1 负反馈放大电路的方框图	253
7.2.3 带有源负载的差分式放大电路	222	8.3.2 负反馈放大电路增益的一般表 达式	254
7.3 集成运算放大器	223	8.4 深度负反馈下的近似计算	255
7.3.1 晶体管集成运算放大器的基本 构成	224	8.5 负反馈对放大电路性能的影响	263
7.3.2 场效应管集成运算放大器的基 本构成	228	8.5.1 提高增益的稳定性	263
7.3.3 集成运算放大器的主要参数	229	8.5.2 对输入电阻、输出电阻的影响	264
7.3.4 理想运算放大器	231	8.5.3 减小非线性失真	267
7.4* 集成功率放大器	231	8.5.4 展宽频带	268
7.4.1 集成功放 LM380/LM384	231	8.6 负反馈放大电路的自激振荡	269
7.4.2 BiMOS 集成功放 SHM1150II	232	8.6.1 负反馈放大电路的自激振荡及 稳定工作条件	269
7.5 模拟乘法器	233	8.6.2* 自激振荡的消除方法	274
7.5.1 模拟乘法器的基本原理	234	本章小结	276
7.5.2 集成模拟乘法器的主要参数	235	自我检测题	276
本章小结	236	习题	278
自我检测题	236	9 信号的运算和处理	285
习题	238	9.1 运算放大器的电路模型	285
8 负反馈放大电路	244	9.1.1 电路模型	285
8.1 反馈的基本概念	244	9.1.2 集成运放的线性工作区	286
8.1.1 什么叫反馈	244	9.1.3 理想运算放大电路的虚短和 虚断	287
8.1.2 正反馈与负反馈	245	9.2 基本运算电路	288
8.1.3 直流反馈与交流反馈	246	9.2.1 比例运算电路	288
8.1.4 串联反馈与并联反馈	248	9.2.2 加减运算电路	292
8.1.5 电压反馈与电流反馈	248	9.2.3 积分和微分运算电路	297

9.2.4 对数和反对数运算电路	302	10.4.2 石英晶体振荡电路	349
9.2.5 用模拟乘法器构成的运算电路	303	10.5* 电压比较器	350
9.3 滤波电路	306	10.5.1 电压比较器的基本概念	350
9.3.1 滤波电路的基本概念与分类	306	10.5.2 单门限比较器	351
9.3.2 低通滤波电路	307	10.5.3 滞回比较器	354
9.3.3 高通滤波电路	312	10.5.4 窗口比较器	359
9.3.4 带通滤波电路	315	10.5.5 集成电压比较器	361
9.3.5 带阻滤波电路	317	10.6* 非正弦波产生电路	362
9.4* 开关电容滤波电路	320	10.6.1 方波和矩形波产生电路	362
9.4.1 开关电容的等效电阻	321	10.6.2 三角波和锯齿波产生电路	364
9.4.2 开关电容滤波电路	322	10.6.3 压控振荡器	367
本章小结	322	10.6.4 集成函数信号发生器	369
自我检测题	323	本章小结	372
习题	324	自我检测题	373
10 信号产生电路	333	习题	374
10.1 正弦波振荡电路的基本概念	333	11 直流电源	381
10.1.1 振荡条件	333	11.1 小功率整流滤波电路	382
10.1.2 与负反馈自激振荡条件的 比较	334	11.1.1 单相桥式整流电路	382
10.1.3 正弦波振荡电路的组成部分	334	11.1.2 滤波电路	384
10.1.4 振荡电路的分析方法	335	11.2 稳压电路	387
10.1.5 振荡电路的分类	335	11.2.1 稳压电源的质量指标	387
10.2 RC 正弦波振荡电路	335	11.2.2 稳压管稳压电路	388
10.2.1 RC 串并联网络的频率特性	335	11.2.3 串联反馈式稳压电路	391
10.2.2 RC 正弦波振荡电路的工作 原理	336	11.2.4 集成稳压器中的基准电压 电路	396
10.3 LC 正弦波振荡电路	340	11.2.5 输出电压固定的三端集成 稳压器	397
10.3.1 LC 并联回路的频率特性	340	11.2.6 三端可调式集成稳压器	402
10.3.2 LC 振荡电路的组成和分析 方法	342	11.3 开关型稳压电路	405
10.3.3 变压器反馈式 LC 振荡电路	343	11.3.1 串联开关型稳压电路	405
10.3.4 电感反馈式 LC 振荡电路	343	11.3.2 并联型开关稳压电路	407
10.3.5 电容反馈式 LC 振荡器	344	本章小结	409
10.4 石英晶体正弦波振荡电路	347	自我检测题	409
10.4.1 石英晶体的等效电路	348	习题	411
部分习题参考答案	417		
参考文献	430		

第一篇 半导体器件基础

半导体器件是现代电子技术的基础,由于体积小、重量轻、寿命长等特点,半导体器件在电子技术领域正得到越来越多的应用。

本篇将对构成电子电路的基本元器件——二极管、晶体管等进行介绍。

1 半导体二极管

本章将从半导体的基本知识介绍入手,对PN结的形成、特点等进行讨论,并介绍一种重要的半导体器件——二极管。

1.1 半导体的基本知识

世界上的物质按照导电性能可以分为三类:一类是**导体**,如金、银、铜、铝等,它们的电导率在 10^6S/cm 数量级;一类是**绝缘体**,如橡皮、木材、云母、陶瓷等,它们的电导率在 $10^{-22} \sim 10^{-4}\text{S/cm}$ 数量级;剩下的一类就是**半导体**,常见的有锗、硅、砷化镓等,它们的电导率在 $10^{-9} \sim 10^2\text{S/cm}$ 数量级。

半导体材料具有以下几个主要特点:

1. 其导电性能介于导体和绝缘体之间;
2. 其导电能力在外界光和热的刺激下会发生很大变化,利用这个特点可以制成各种光敏和热敏元件;
3. 其导电能力在掺进微量杂质后会发生很大变化,利用这个特点可以制成各类半导体器件。

1.1.1 半导体的共价键结构

物质的导电性能的不同来源于原子结构的不同,导体(低价元素)的原子核外的最外层电子(称为**价电子**)较少,容易挣脱原子核的束缚成为自由电子,所以导电能力强;惰性气体、高分子物质(橡胶、塑料等)等高价元素的最外层电子受原子核束缚很强,很难挣脱原子核的束缚成为自由电子,所以导电能力弱;半导体的最外层电子一般为4个,以半导体材料中使用得最多的硅和锗为例,其原子结构简化模型如图1.1.1所示,图中 \oplus 表示除价电子以外的内层电子和原子核

组成的稳定的正离子结构。

纯净的半导体经过一定的制造工艺构成单晶时,每个原子的最外层 4 个电子就不仅被自己的原子核所拥有,还被周围的原子核所共有,形成所谓的共价键结构,如图 1.1.2 所示。

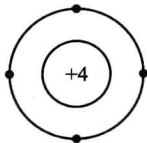


图 1.1.1 硅和锗的原子结构简化模型

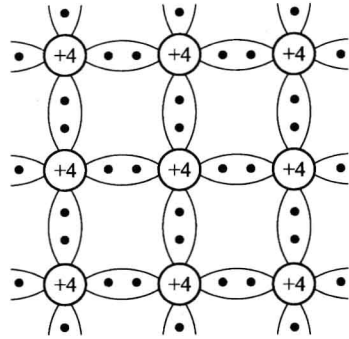


图 1.1.2 共价键二维结构示意图

1.1.2 本征半导体及其本征激发

完全纯净、结构完整的半导体晶体称为**本征半导体**。

可以移动的带电粒子称为**载流子**。材料的电导率与单位体积中的载流子数目相关,载流子浓度越大,电导率就越高。

在热力学温度 $T = 0\text{K}$ 和无外界其他因素激发时,本征半导体共价键中的价电子被共价键所束缚,半导体中无载流子存在,相当于绝缘体。

在室温下 ($T = 300\text{K}$) 或有外界光和热的刺激时,少数共价键中的价电子获得足够能量,挣脱共价键的束缚成为自由电子,这个过程称为**本征激发**。

本征激发的价电子挣脱共价键的束缚后,成为自由电子,同时在原来的共价键里就留下一个空位,这个空位称为**空穴**,如图 1.1.3 所示,空穴是和自由电子成对出现的,所以称它们为**电子空穴对**,其数量与温度有关。

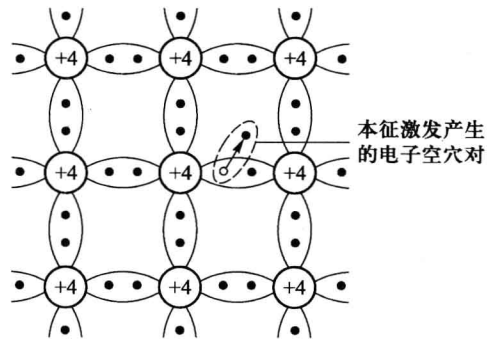


图 1.1.3 本征激发产生的电子空穴对

本征激发时半导体的共价键中出现空穴,这是半导体区别于导体的一个重要特点。

共价键上的价电子挣脱共价键束缚成为自由电子后,在外电场的作用下,一方面自由电子将在外电场作用下进行定向移动,形成电子电流;另一方面,由于空穴的存在,在本征半导体内部将产生如下运动:2 位置的价电子挣脱其共价键的束缚,跳出来填补 1 位置的空穴,在 2 位置留下新的空穴;3 位置的价电子又挣脱其共价键的束缚,跳出来填补 2 位置的空穴,从而在 3 位置又留下新的空穴……如图 1.1.4 所示。

这样,在外电场作用下,价电子的移动方向是由位置3→位置2→位置1,这些价电子在移动后仍然处于被共价键束缚的状态;空穴的移动方向是从位置1→位置2→位置3。因此,空穴移动的方向和价电子移动的方向是相反的,可以用空穴移动产生的电流来表示价电子移动产生的电流。

由于空穴的出现是由本征激发引起的,只有当自由电子出现后,才有空穴形成。电子是带负电的粒子,虽然空穴是自由电子形成后产生的空位,但从电荷移动的角度来说,它相当于是带电量与电子相等的、符号与电子相反的带电粒子,所以,空穴是带正电的载流子。

在外电场作用下,本征半导体中的电流是电子电流和空穴电流的和。

在本征半导体中,除了本征激发产生电子空穴对以外,当自由电子与空穴相遇时,会复合产生新的共价键,把这种现象称为自由电子和空穴的**复合**。温度一定时,当本征半导体内部的激发率与复合率相等,达到动态平衡时,载流子的浓度将不再改变。任何情况下,本征半导体中的自由电子浓度与空穴浓度相等,即

$$n_i = p_i \quad (1.1.1)$$

式中, n_i 为本征激发的自由电子浓度, p_i 为本征激发的空穴浓度。

本征半导体中,载流子的浓度越高,电导率越大,在外电场作用下形成的电流就越大。本征半导体的导电能力与外界温度有关,温度越高,本征激发的电子空穴对越多,载流子的浓度越大,本征半导体的导电能力越强。

1.1.3 杂质半导体

实际的半导体材料在本征半导体中掺入微量杂质,使其导电性能产生质的变化,称为**杂质半导体**。根据掺入的杂质的不同分为P型半导体和N型半导体。

1. P型半导体

在本征半导体(硅或锗)中掺入少量三价元素的杂质,例如硼,由于三价元素的最外层只有3个价电子,在与硅或锗原子构成共价键时,因为缺少一个电子,将产生一个空位,邻近共价键中的价电子受热刺激或其他激发获得能量后,挣脱其共价键的束缚,填补这个空位,硼原子获得电子成为稳定的负离子结构,这样在硅或锗原子的共价键上形成一个空穴,如图1.1.5所示,注意:这个空穴的形成不同于本征激发,它不伴随自由电子的产生。

由于硼原子获得电子,将它称为**受主杂质**或**P型杂质**,此种半导体称为空穴型半导体或**P型半导体**。

除因三价杂质的存在而产生空穴外,在外界光和热的刺激下,半导体内的本征晶体部分的本征激发也产生电子空穴对,由于本征激发的电子和空穴的浓度相等,三价杂质的存在又产生额外

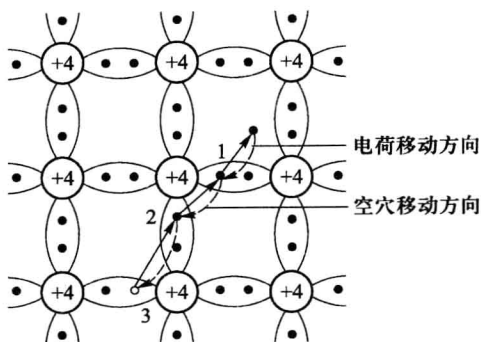


图 1.1.4 本征半导体中的载流子

的空穴,所以 P 型半导体中,空穴占多数,为**多数载流子**,简称**多子**;电子为**少数载流子**,简称**少子**。

2. N 型半导体

在硅或锗中掺入少量五价元素的杂质,例如磷,由于五价元素的最外层有 5 个价电子,在与硅或锗原子构成共价键时,多余一个电子,它不受共价键的束缚,只需获得较少的能量(常温下的热激发)就能成为自由电子,使磷原子失去电子成为稳定的正离子结构,如图 1.1.6 所示。

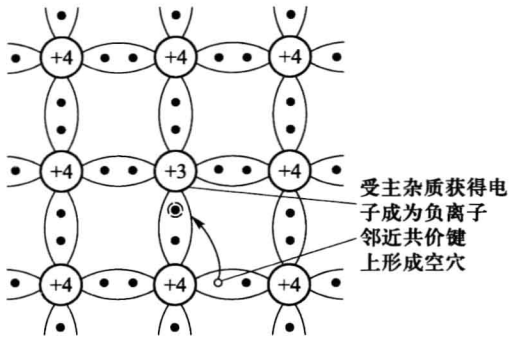


图 1.1.5 P 型半导体

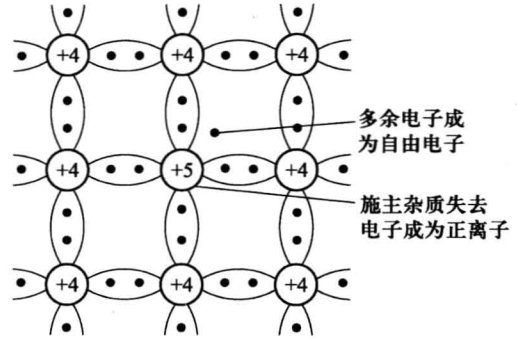


图 1.1.6 N 型半导体

由于磷原子失去价电子,将它称为**施主杂质**或**N 型杂质**,此种半导体称为**电子型半导体**或**N 型半导体**。

同样,除杂质产生电子外,在外界光和热的刺激下,半导体内的本征晶体部分也产生电子空穴对,所以,N 型半导体中,电子为**多数载流子(多子)**;空穴为**少数载流子(少子)**。

总之,杂质半导体中,由于杂质的掺入,将使多子的浓度高于少子的浓度,高出的程度与掺入杂质的多少有关;少子浓度由本征激发引起,与温度有关。

掺杂后,由于多子浓度高于少子浓度,也使多子与少子的复合机会增加,这样少子的浓度会更低,一定温度下,掺杂前后的电子空穴浓度的乘积为常数,即

$$np = n_i p_i \quad (1.1.2)$$

式中, n 为掺杂后的电子浓度, p 为掺杂后的空穴浓度。由于

$$n_i = p_i$$

所以

$$np = n_i^2 = p_i^2 \quad (1.1.3)$$

杂质半导体的多子浓度近似与杂质浓度相等,因此受温度的影响很小;少子浓度虽然很低,但是由于是本征激发形成的,所以对温度非常敏感。

1.2 PN 结的形成及特性

在一片完整的晶片上,掺入不同的杂质使一边形成 P 型半导体,另一边形成 N 型半导体,如

图 1.2.1 所示。图中用正离子和电子表示 N 型半导体;用负离子和空穴表示 P 型半导体,另外还考虑了两种杂质半导体中由于本征激发产生的少量电子空穴对。

1.2.1 载流子的扩散及漂移

把由于浓度差别产生的载流子运动称为**扩散运动**,把电场力作用下载流子的运动称为**漂移运动**。

P 型半导体和 N 型半导体结合后,由于两边载流子浓度的差别,两边的多数载流子都会从浓度高处向浓度低处扩散,如图 1.2.1(a)所示:P 型区的空穴向 N 型区扩散,部分空穴在界面处与 N 型区的电子复合,留下稳定结构的正离子;N 型区的电子向 P 型区扩散,部分电子在界面处与 P 型区的空穴复合,留下稳定结构的负离子。正负离子由于物质结构关系,是不导电的,把这些不导电的正负离子称为**空间电荷**,这样,在 P 型区和 N 型区的界面处就形成一个很薄的**空间电荷区**,也就是**PN 结**,如图 1.2.1(b)所示。

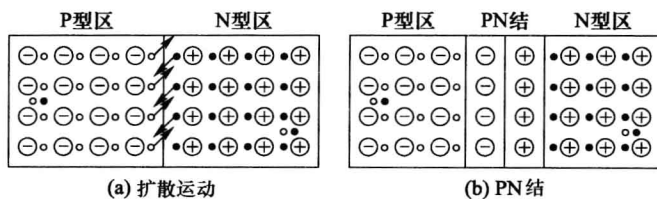


图 1.2.1 PN 结中的扩散运动

空间电荷区形成后,PN 结内形成一个从 N 型区指向 P 型区的电场,此电场是在 PN 结内部产生的,所以称为**内电场 $E_{内}$** ,它对两边的多数载流子的扩散形成阻碍作用,但有利于少数载流子向对方的漂移,如图 1.2.2 所示。

P 型区和 N 型区的少数载流子漂移运动的结果是:补充了空间电荷区被复合掉的载流子,使空间电荷区变窄,相应地,内电场减小。

可见,载流子的扩散和漂移是一对矛盾的运动方式:扩散使空间电荷区变宽,内电场增加,对多数载流子的扩散阻力增加,有利于少数载流子的漂移;而漂移又使空间电荷区变窄,内电场减小,对多数载流子的扩散有利,不利于漂移……PN 结形成的初期,先是扩散运动占优势,随着扩散的进行,内电场的增加,漂移运动不断加强,当扩散和漂移达到动态平衡时,空间电荷区不再变化,PN 结形成。

所以,在工程上 PN 结有几种不同的名称:

- ① 它是由不导电的正负离子所构成的区域,因此称为**空间电荷区**;
- ② 在 PN 结内,载流子被复合掉了,或者说是被消耗尽了,因此又称为**耗尽层**;

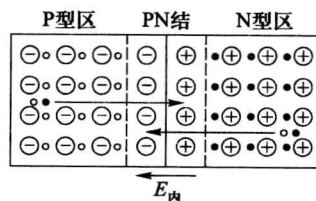


图 1.2.2 内电场有利于少数载流子的漂移

③ PN 结的内电场阻碍多数载流子的扩散运动,因此又称为阻挡层;

④ PN 结的内电场形成后,N 型区比 P 型区的电位高,其大小为

$$V_0 = E_{\text{内}} d \quad (1.2.1)$$

式中, d 为 PN 结的厚度, V_0 称为接触电位差。

此时,P 型区和 N 型区的电子势能将不相同,P 型区的电子势能比 N 型区高 qV_0 ,电子要越过阻挡层就要越过一个能量的高坡——势垒,因此,PN 结又称为势垒区,如图 1.2.3 所示。

1.2.2 PN 结的单向导电性

PN 结没有外加电压时,扩散与漂移形成动态平衡,PN 结也处于平衡状态。

1. PN 结外加正向电压

P 型区接电源的正极,N 型区接电源的负极,PN 结外加正向电压 V_F 如图 1.2.4 所示,此种情况称 PN 结正向偏置。

由于 PN 结是由空间电荷构成的,其中几乎没有载流子,电阻率很高,而 P 型区和 N 型区相对来说电阻率较低,所以外加的电压几乎全部落在 PN 结上,形成与内电场方向相反的外电场 $E_{\text{外}}$,这样 PN 结的结电场被削弱为 $(E_{\text{内}} - E_{\text{外}})$,空间电荷区将相应变窄,对多数载流子扩散的阻碍作用减小,有利于多数载流子的扩散,不利于少数载流子的漂移。

从另一方面说,正偏置情况下,P 型区和 N 型区的接触电位差降低到 $(V_0 - V_{\text{外}})$,使电子势能差降低,P 型区和 N 型区的多子比较容易越过势垒形成扩散电流。

所以,这种情况下流过 PN 结的电流主要是扩散电流,在外电路就表现为一个流进 P 型区的电流 I_F ,由于此电流由多子扩散形成,较大,所以称正偏置的 PN 结处于导通状态。

当外加电压 V_F 有变化时,PN 结的厚度 d 将变化,对扩散电流的阻碍作用随之变化,外部电流 I_F 就变化,而且,只要 V_F 有很小的变化, I_F 就变化很多,因此,PN 结正向偏置时表现为小电阻的特性。

2. PN 结外加反向电压

N 型区接电源的正极,P 型区接电源的负极,PN 结外加反向电压 V_R 如图 1.2.5 所示,此种情况称 PN 结反向偏置。

此时外电场的方向与内电场方向相同,PN 结的结电

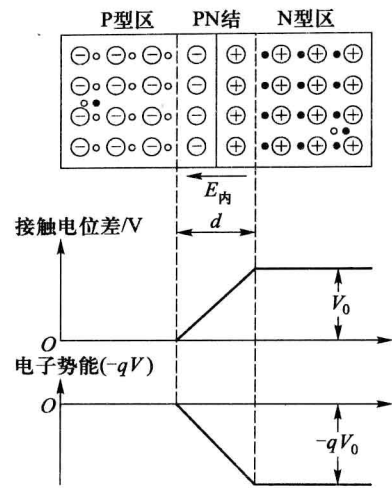


图 1.2.3 势垒区

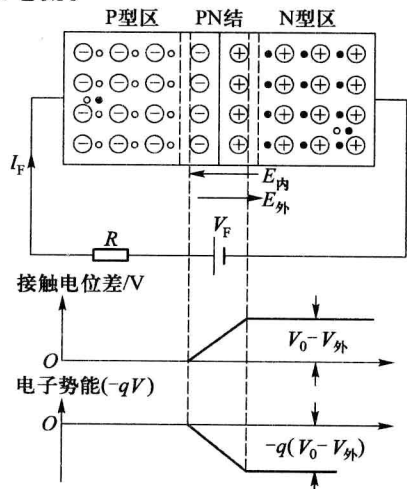


图 1.2.4 PN 结正偏置