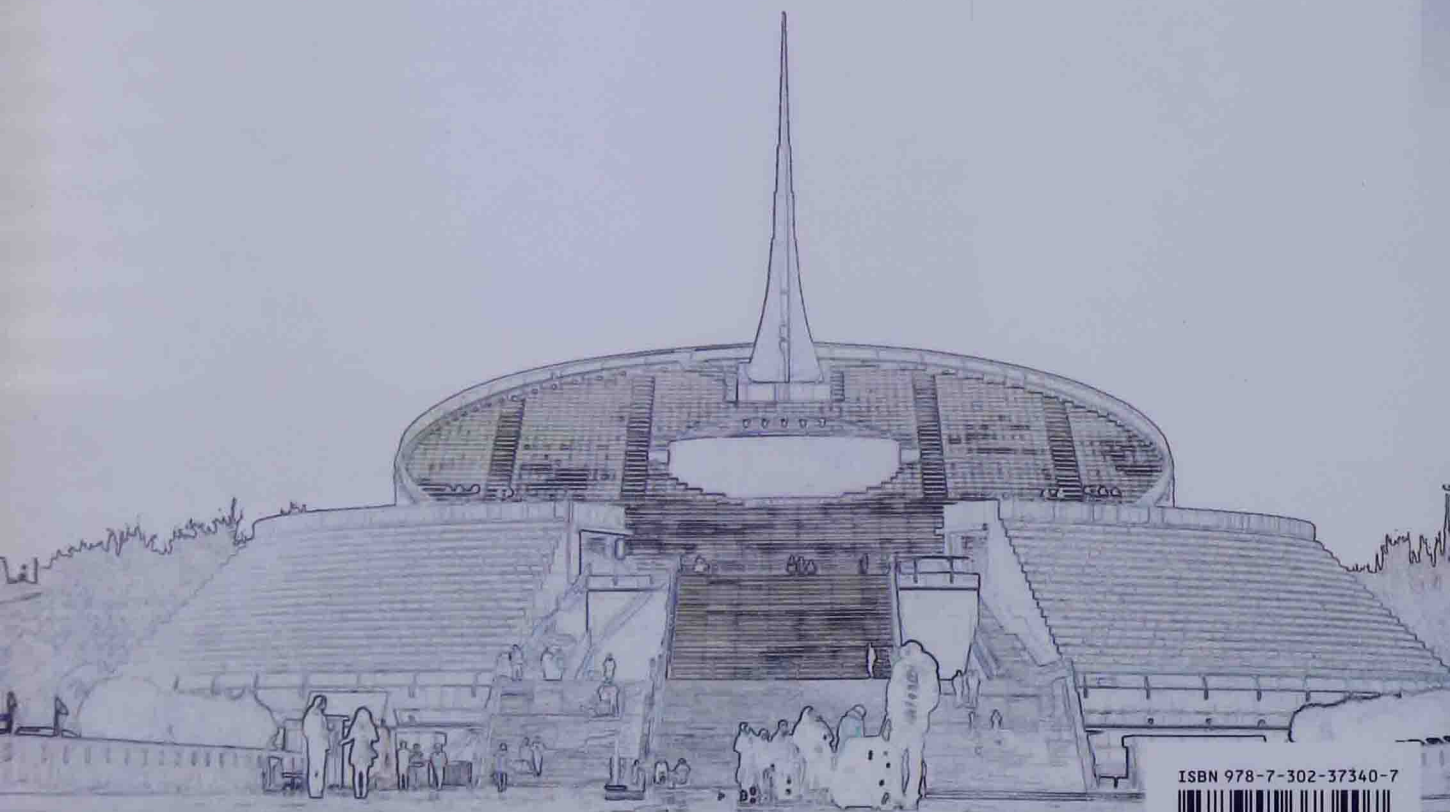


作者简介

元增民，高级工程师、教授。1977级大学生，1982年于河北工学院（现河北工业大学）本科毕业，1985年于河北工学院研究生毕业。主持或参加国家七五攻关项目UD80型换刀换箱柔性加工单元等工程及科研项目10余项。讲授课程20多门（上万学时）。发表“AT89S51单片机与ADC0809模数转换器的三种典型连接”等论文40多篇。出版《模拟电子技术》等三种教科书累计5个版次。学生赞誉他为“人民的好老师”。

本书特色

1. 说理透彻。如硅二极管正向压降0.4~0.8V及温度系数 $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 都娓娓道来。
2. 弃远抄近。如把二极管当成电源配合熊仔爬山法计算PN结电路如履平地。
3. 知识点多。如放大电路输出范围上下限频率效率等一参数九指标样样齐全。
4. 人无我有。如放大器临界偏置电阻及电压计算使偏置分析设计似闲庭信步。
5. 人有我精。如BJT三种组态放大器三大放大倍数计算公式已统一好记好用。
6. 计算迅捷。如放大器上下限频率计算已采用一种误差 $<2\%$ 的高精近似方法。
7. 分析简便。如加减反馈思路及相位移法使很烦人的反馈分析设计易如反掌。
8. 针对性好。如多级放大器电压放大倍数算法 $A_u=A_{u01}A_{u2}$ 已为注电考试所用。



清华大学出版社数字出版网站

WQBook 书文局泉

www.wqbook.com

ISBN 978-7-302-37340-7



9 787302 373407 >

定价：35.00元

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

模拟电子技术简明教程

元增民 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍 BJT 和 FET 两种半导体器件,以及放大、反馈、滤波、振荡、电源五大模块。本书特点:层次有别,重点突出,如工作点分为内涵与外延;有来有去,逻辑性强,如根据输出范围最大要求寻求临界工作点;分析计算力求定量,如对工作点稳定性的分析实现定量设计;电路分析透彻周到,如放大器一参数九指标分析计算齐全;详略得当,深浅有序,如介绍三极管时,以讲透三极管三特性为宜,介绍集成放大器工作原理时,以讲清三项关键技术——差分放大、电流镜和有源负载技术——为宜;联接孤岛融会贯通,如根据方波的梯形畸变来计算运放芯片压摆率;抓住要害有的放矢,如针对削平失真、上矮胖下瘦长的非线性失真及交越失真等三大几何失真进行放大器、振荡器的设计。同时,本书简化了分析计算,如放大器下限频率计算采用高精度近似方法,如用 $\sum \varphi = \varphi_a + \varphi_i + \varphi_c = 2n\pi$ 或 $(2n+1)\pi$ 统一判断反馈相位条件即反馈极性。力求更好适合应用型本科、注册电气工程师执业资格考试培训、专科和高职高专教学以及最广泛的中初级层次读者自学的需求。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术简明教程/元增民主编.--北京:清华大学出版社,2014

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

ISBN 978-7-302-37340-7

I. ①模… II. ①元… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 159498 号

责任编辑:文 怡

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18.5 字 数:446 千字

版 次:2014 年 11 月第 1 版 印 次:2014 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:35.00 元

产品编号:057845-01

本书的前身《模拟电子技术》于2009年由中国电力出版社出版。虽然作者名不见经传,也没有依赖什么光环,但这本书还是受到广大读者的热忱欢迎,并且加印了。说明作者真正与读者站在一起,想读者之所思,谋读者之所急,解读者之所疑。经优化充实加强以后,《模拟电子技术(修订版)》于2013年由清华大学出版社出版。

《模拟电子技术》两个版本的连续出版,是针对模拟电子学历史较短、成课历史更短、传统模电教科书存在大量谬误的现状,试图从根本上减轻读者的学习难度,改善模电课程的教学质量。五年来的教学实践表明,按照本书的新知识体系组织教学,考试及格率已经稳步提高到95%。即使教学按照旧知识体系组织,只要学生使用本书,考试及格率也会明显提高。根本原因是本书的新知识体系不仅系统全面,而且全面覆盖和包容了旧知识体系。

尽管传统模拟电子技术教科书弊病很多,但是隐蔽性很强,通常读者没有七年八年时间、十遍百遍读书,还是很难发现的。等到最后发现了,很多读者早就白了少年头。继续揭示传统模电教科书的缺陷,很有必要。此举几例。

(1) 忽视少子只有多子的50亿分之一的事实,认为少子漂移能与多子扩散相平衡,导致自由PN结内电场内建电势 U_{ho} 大小不得而知,并错误认为导通PN结还有内电场(U_h)。 U_{ho} 、 U_h 及放大器输出范围 $U_{om(max)}$,已被戏称为传统模拟电子学解不开的3个 U 。

(2) 分压偏置放大器直流计算生硬地扔掉等效内阻,直接把开路电压加在负载电阻上。学生在电路课刚刚学过的戴维南定理被丢弃,造成两位百分数的计算误差。

(3) 共集及共基放大器频带计算很少。说共基放大器频带最宽,理由仅有共基放大器自身电压放大倍数 $A_u = \beta R'_L / r_{be}$ 与共射放大器 $A_u = -\beta R'_L / r_{be}$ 只差一个正负号,真是牵强附会。

(4) 多级放大器电压增益计算错误。如2012年注册电气工程师执业资格考试发输变电专业基础第25题,备选答案A. 3.3V、B. 2.3V、C. 2.0V、D. 1.8V中3.3V为正确选项。用传统方法 $A_u = A_{u1} A_{u2}$ 计算结果为0.9V,与所有答案都相差甚远,误差更是高达73%。

(5) 罔顾长尾差放双端输出时用 $R_L/2$ 、单端输出时用 R_L 计算等效负载电阻的事实,天真地认为长尾差放单端输出时电压增益是双端输出时的一半。

以某校模拟电子技术课程考试中一道30分的计算题为例,其参考答案中错误竟然多达9条。俗话讲教给学生一杯水,教师要有一桶水;现实却是教给学生一桶水,教师只有一杯水。

读者用传统模电教科书,如看天书,如走迷宫,如闯暗道。难怪学生模电理论课莫名其妙、仰天望地、昏然入梦,实验课无从下手、一脸惆怅、屡屡拖堂,考试及格率甚至降到30%以下。大学四年,本来是人的一生中最灿烂的时光,实际上无数大学生一直笼罩在正考、补

考、重修、毕业前一次性补考的阴影中。欢蹦乱跳的孩子经大学培养教育,本来应当更聪明,实际很多变得笨拙了,甚至“刀枪不入”。错漏连篇的教科书难咎其责。

传统模电教科书存在大量缺陷,几成大家的共识。问题是如何应对。一种应对,是消极应对,只是片面降低教学难度。例如,学生不会搭实验电路,就改用模板。某实验设备厂的模电教学模板已从2种扩展到5种。昂贵的实验台几乎沦为模板的基座。用模板做实验,尽管学生只需接两根电源线加输入输出共四根线,虽然简单透顶,但是很多学生还是无奈。一学期闪过去了,别说学到啥,很多学生就连已经老掉牙的色环电阻都不认识。

另一种应对,是根本应对,就是从基础理论研究及改进教科书做起。经过几十年来的不懈研究,作者工作重心已经从大面积开荒转为精心梳理,从能做能算发展到算得更准更好更简单。已将三组态BJT放大器的电压、电流、功率增益计算公式统一为一种规范形式,极大地方便读者记忆应用。放大器上下限频率计算已改用一种高精度近似方法。已用比较环节相移 φ_c 概念及相位条件 $\sum \varphi = \varphi_a + \varphi_f + \varphi_c = 2n\pi$ 或 $(2n+1)\pi$ 快速判断反馈极性。

参加注册电气工程师执业资格考试(以下简称注电执业资格考试)的学员反映,电路课好考,模数电难考,电机课更是准备全部放弃。注电执业资格考试中的基础考试满分240分,及格线132分,折合百分制55分,很多考生主要丢分在模数电等课程。注电执业资格考试作为一种国考,已对高校模电教学提出了新的要求。

以2012年注电执业资格考试发输变电专业基础试题第25题为例,用本书的前身《模拟电子技术》第一版就开始介绍的开路电压法 $A_u = A_{uol} A_{u2}$ 计算,结果为3.4V,与正确选项3.3V吻合很好。注电执业资格考试中诸如失真判断及反馈设计等题目,用传统方法求解很难很烦,若用本书方法,则易如反掌。

《模拟电子技术(修订版)》与第一版相比,知识体系虽更加系统,但篇幅略长、讲解略深。为更好适应更多层次、更多要求的课程教学及自学,作者决定将《模拟电子技术》继续向宽精深方向发展,编写《模拟电子技术简明教程》,形成互补的系列。

为弥补实验条件不足,进一步改善教学效果,作者多年来讲授模电理论课时一直进行随堂实验。前期成果已写进本书,每章末都安排了至少一个切实可行的仿真与实训项目。

参加本书策划及编撰工作的有杨海、霍览宇、李艳玲、元增民等同志。张华同志一直给予了很大支持,全国各地很多读者提出了不少宝贵建议,在此一并致以最诚挚的谢意。

本书备有电子课件,登录清华大学出版社网站 www.tup.tsinghua.edu.cn 可免费下载。

以精致的文字、严密的逻辑、合时的题材、丰富的内涵服务社会,是作者一直以来的宗旨。但因认识水平有限,不足之处还望大家多多指正。意见请发电子邮件到 yzm@126.com。

作者

2014年金秋于长沙浏阳河畔

主要符号表

1. 专用下标

s: ① 信号 ② FET 源极

g: FET 栅极

d: FET 漏极

b: BJT 基极

c: BJT 集电极

e: BJT 发射极

r: 电阻

i: 输入

o: 输出, 负载

m: 电流或电压幅度

2. 专用符号

β : BJT 电流放大倍数

g_m : FET 跨导

θ : BJT 电流放大倍数 β 值温度系数

λ : 集电极偏置电流的温度系数

ξ : 集-射极偏置电压的温度系数

σ : 输出范围的温度系数

3. 带下标的参量

R_b : BJT 基极外接偏置电阻

R_c : BJT 集电极外接安伏变换器

R_e : BJT 发射极外接反馈电阻

R_g : FET 栅极外接偏置电阻

R_d : FET 漏极外接安伏变换器

R_s : FET 源极外接反馈电阻

R_L : 放大电路负载电阻

r_s : 信号源内阻

r_{be} : BJT 发射结电阻 (b、e 动态电阻)

r_{ce} : BJT 输出电阻 (c、e 动态电阻)

r_{ds} : FET 输出电阻 (d、s 动态电阻)

r_i : 放大电路输入电阻

r_o : 放大电路输出电阻

$\dot{E}_s$: 信号源电动势相量, E_s 为其有效值

$\dot{I}_s$: 信号源瞬时总电流, I_s 为其有效值

i_b : BJT 基极瞬时总电流

i_c : BJT 集电极瞬时总电流

i_e : BJT 发射极瞬时总电流

i_d : FET 漏极瞬时总电流

i_r : 某电阻瞬时总电流

I_b 、 I_c 、 I_e 、 I_d : 直流偏置电流

$I_{c(cr)}$ 、 $I_{e(cr)}$ 、 $I_{d(cr)}$: 直流偏置电流临界值

I_{dss0} : 零电阻零栅压漏极电流

I_{dss} : 零栅压漏极电流

u_{ce} : BJT 集-射极电压瞬时值

U_{ce} : BJT 集-射极偏置电压

$U_{ce(cr)}$: BJT 集-射极偏置电压临界值

u_{ds} : FET 漏-源极电压(降)瞬时值

U_{ds} : FETL 漏-源极偏置电压

$U_{ds(cr)}$: FET 漏-源极偏置电压临界值

$\dot{U}_o$: 负载电压(相量)

U_o : 负载电压有效值

U_{om} : 负载电压幅度

$U_{om(max)}$: 负载电压最大幅度(动态范围)

$\dot{I}_o$: 负载电流(相量)

A_u : 源电压放大倍数

A_{uz} : 放大电路自身电压放大倍数

A_i : 电流放大倍数

A_p : 功率放大倍数

目 录

第 1 章 晶体管	1
1.1 半导体 PN 结与晶体二极管数理模型	1
1.1.1 半导体	1
1.1.2 PN 结自由电子扩散势、内电场及其单向导电性	4
1.1.3 二极管(PN 结)数理模型	7
1.2 晶体二极管种类、参数及应用	10
1.3 晶体三极管原理及数理模型	17
1.3.1 背靠背的 PN 结——三极管工作原理	17
1.3.2 三极管三特性	18
1.3.3 三极管数理模型	24
1.4 三极管技术参数及测试应用	27
1.4.1 三极管技术参数	27
1.4.2 三极管测试鉴别	29
1.4.3 三极管产品形态	32
1.4.4 三极管封装应用	35
1.5 本章小结	37
1.6 仿真与实训一 LED 控制	38
1.7 习题一	39
第 2 章 场效管	41
2.1 结型场效管	41
2.1.1 JFET 工作原理	41
2.1.2 JFET 传输特性	42
2.1.3 JFET 输出特性	45
2.1.4 JFET 数理模型及技术参数	47
2.2 金属氧化物半导体场效管	52
2.2.1 金属氧化物半导体场效管工作原理及特性参数	52
2.2.2 各种 FET 及其与 BJT 的综合对比	56
2.3 本章小结	58
2.4 仿真与实训二 JFET 控制 LED	59
2.5 习题二	60

第3章 晶体管放大电路	61
3.1 基本共射放大电路	61
3.1.1 用直流器件放大交流信号的原理	61
3.1.2 基本共射放大电路设计计算	63
3.1.3 基本共射放大电路分析计算	69
3.2 射极偏置共射放大电路	73
3.2.1 工作点及其稳定性设计	73
3.2.2 工作点及交流参数分析计算	77
3.3 共集放大电路(射极输出器)	80
3.3.1 工作点及其稳定性设计	80
3.3.2 工作点及交流参数分析计算	81
3.4 共基放大电路(电流跟随器)	84
3.5 放大电路工作点及输出范围的图解分析	87
3.6 本章小结	89
3.7 仿真与实训三 基本共射放大电路	91
3.8 习题三	94
第4章 场效应管放大电路	96
4.1 栅极无偏置共源放大电路	96
4.2 源极偏置共源放大电路	99
4.3 共漏放大电路(源极输出器)	103
4.4 栅极无偏置共栅放大电路(电流缓冲器)	106
4.5 源极偏置共栅放大电路(电流缓冲器)	107
4.6 本章小结	109
4.7 仿真与实训四 栅极无偏共源放大电路	110
4.8 习题四	110
第5章 多级放大电路与功率放大电路	112
5.1 放大电路级间耦合方式及磁耦合放大电路	112
5.1.1 放大电路级间耦合方式	112
5.1.2 磁耦合放大电路	113
5.2 多级放大电路技术参数与频率特性	114
5.2.1 电压放大倍数与频率特性	114
5.2.2 输入输出电阻及工作点	116
5.3 乙类及甲乙类互补功率放大电路	121
5.3.1 电路种类与工作原理	121
5.3.2 技术参数指标分析与设计	124
5.4 电容耦合互补功率放大电路	127

5.5	本章小结	131
5.6	仿真与实训五 电容耦合 OTL 功放	132
5.7	习题五	132
第 6 章	差分放大与集成放大电路	134
6.1	基本差分放大电路	134
6.1.1	差分放大基本概念	134
6.1.2	基本差分放大电路工作原理	135
6.2	长尾差分放大电路	137
6.2.1	BJT 长尾差分放大电路偏置设计	137
6.2.2	工作点、电压增益与共模抑制比分析计算	139
6.2.3	输出模式对共模抑制比的影响	141
6.2.4	FET 长尾差分放大电路	144
6.3	电流源偏置差分放大电路	145
6.4	电流镜及电流镜偏置差分放大电路	148
6.4.1	BJT 电流镜种类及工作原理	148
6.4.2	电流镜偏置差分放大电路	150
6.4.3	FET 镜像电流镜(电流接力棒)	152
6.5	有源负载差分放大电路	152
6.6	从分立放大电路到集成放大电路的发展	154
6.7	集成运算放大器	156
6.7.1	集成运算放大器典型产品	156
6.7.2	集成运算放大器技术参数及其分类	160
6.8	集成功率放大器	163
6.9	本章小结	165
6.10	仿真与实训六 电流镜	166
6.11	习题六	167
第 7 章	反馈原理	170
7.1	反馈概念与反馈分类	170
7.1.1	反馈概念	170
7.1.2	反馈分类及反馈组态	172
7.2	反馈极性与反馈作用	175
7.2.1	反馈极性及其判别	175
7.2.2	反馈作用	176
7.3	射极偏置共射放大电路反馈分析计算	178
7.4	集成运算放大电路反馈分析计算	181
7.4.1	集成运算放大器闭环应用误差分析	181

7.4.2	集成运算放大器工程应用分析计算方法	183
7.5	本章小结	186
7.6	仿真与实训七 电压跟随器	187
7.7	习题七	188
第8章	集成运算放大器应用	191
8.1	集成运算放大器的线性应用(1)	191
8.1.1	比例及加减运算	191
8.1.2	微分及积分运算	194
8.2	集成运算放大器的线性应用(2)	196
8.2.1	对数运算及反对数运算	196
8.2.2	模拟乘法器、模拟除法器及开方器	196
8.3	集成运算放大器的线性应用(3)——测量放大器	197
8.4	集成运算放大器的非线性应用——比较器	201
8.4.1	单限比较器	201
8.4.2	滞后比较器	202
8.5	集成运算放大器使用技巧	204
8.6	本章小结	205
8.7	仿真与实训八 升压器	206
8.8	习题八	206
第9章	滤波电路	210
9.1	无源滤波器	210
9.1.1	一阶RC低通滤波器及高通滤波器	210
9.1.2	带通滤波器	214
9.1.3	带阻滤波器	217
9.2	有源滤波器	219
9.2.1	有源低通滤波器	219
9.2.2	有源高通滤波器	221
9.2.3	有源带通、带阻、全通及状态变量滤波器	223
9.3	本章小结	224
9.4	仿真与实训九 多路反馈带通滤波器	225
9.5	习题九	225
第10章	振荡电路	227
10.1	自激振荡原理及振荡电路	227
10.2	分立元件振荡电路	230
10.2.1	电容三点式振荡电路(科比兹振荡器)	230

10.2.2	电感三点式振荡电路(哈特莱振荡器)	232
10.2.3	其他分立元件振荡电路	233
10.3	石英晶体振荡电路	234
10.4	文氏电桥集成振荡电路	237
10.5	非正弦波振荡电路	240
10.5.1	矩形波振荡电路	241
10.5.2	三角波振荡电路与锯齿波振荡电路	244
10.6	本章小结	247
10.7	仿真与实训十 振荡器	248
10.8	习题十	249
第 11 章	直流稳压电源	251
11.1	整流电路	251
11.1.1	单相半波整流电路	251
11.1.2	单相全波整流电路	252
11.1.3	单相桥式整流电路	253
11.1.4	电容降压整流电路	255
11.1.5	倍压整流电路	255
11.2	滤波电路	256
11.3	串联稳压电源	258
11.3.1	分立串联稳压电源	258
11.3.2	集成串联稳压器及应用电路	260
11.4	开关稳压电源	264
11.5	本章小结	266
11.6	仿真与实训十一 220VAC 电源超欠压灯光报警器	266
11.7	习题十一	267
附录 1	多功能电子电路仿真平台 Multisim 应用入门	270
附录 2	应对旧体系模拟电子技术考试的二三事	274
	部分习题参考答案	275
	参考文献	281

第1章 晶 体 管

半导体技术是当代信息技术的核心。本章介绍基于半导体技术制造的晶体二极管、晶体三极管及发光二极管、光电池、光敏二极管、光敏三极管、磁敏三极管等半导体器件。

1.1 半导体 PN 结与晶体二极管数理模型

1.1.1 半导体

电子比原子小得多。电子质量大约只有硅原子的十万分之二。从微观层次看,原子之间是有缝隙的。电子在原子之间的缝隙中不定向地随机运动,物质不显电性。电子在原子之间的缝隙中定向穿梭运动,就会输送电荷而导电。

电导率介于导体与绝缘体之间的材料称为半导体。常见半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。半导体材料有以下 4 个基本特点:

- ① 电导率介于导体与绝缘体之间;
- ② 物质结构为单晶体;
- ③ 微量掺杂后电导率猛然增大;
- ④ 光照或受热后电导率稍微增大。

硅电导率约为 $5 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ (西门子/米),是陶瓷的 1.5×10^9 倍,是铜的 $1/10^{11}$ 。

1. 本征半导体、本征激发及载流子

成分纯净、结构单晶的理想半导体材料称为本征半导体(Intrinsic Semiconductor),其结构如图 1.1.1 所示。

制造半导体器件要用纯度 99.999 999 9% (俗称九个 9) 以上的半导体单晶材料。

四价元素硅原子外层的 4 个电子与相邻原子的外层电子组成稳定的共价键结构。

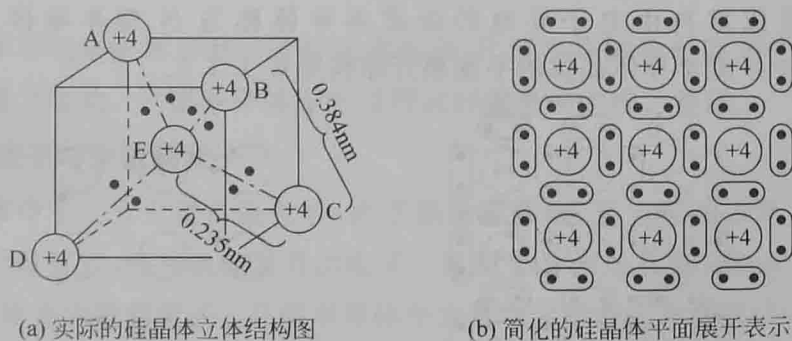


图 1.1.1 本征半导体晶体结构

由于热的影响,本征半导体中会不断地成对出现微量自由电子-空穴,又不断地复合,这种现象叫做本征激发。本征激发使得本征半导体中始终存在等量的自由电子和空穴。有益于导电的自由电子和空穴都叫做载流子。空穴或空位本身并不带电。称空穴为载流子,只是因为空穴为电子的移动即导电提供了方便而已。

每立方厘米本征半导体中的自由电子数用 N_i 表示,等量空穴数用 P_i 表示, $P_i = N_i$,下

标 i 为 intrinsic(本征)的首字母。 N_i 和 P_i 统称为本征载流子浓度。

每立方厘米硅单晶约有 5×10^{22} 个硅原子。温度越高,本征激发越多,本征半导体中的自由电子和空穴数量越多。室温时本征载流子浓度 $N_i = P_i \approx 1.4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ 。 $5 \times 10^{22} / (1.4 \times 10^{10}) \approx 3.6 \times 10^{12}$,室温时硅晶体中每 3.6×10^{12} 个硅原子中才有一个硅原子释放出一个电子和空穴。本征激发产生的载流子相对很少,而本征半导体材料电导率很低。

2. 杂质半导体——N 型半导体与 P 型半导体

常温下硅晶体为金刚石结构,呈灰黑色闪亮金属光泽。硅的熔点为 1410°C 。约 850°C 高温时硅晶体开始松散,此时可以按照下列两条要求有意识地掺入杂质。

(1) 掺入杂质为三价元素或五价元素。

分别掺入三价元素和五价元素将形成特性互补的杂质半导体。

(2) 掺杂量适当,通常为百万分之一甚至更微量的掺杂。

掺杂使自由电子和空穴的数量不再相等,结果形成了多数载流子和少数载流子。

掺杂浓度有两种表达方式,一是每立方厘米晶体内掺入的杂质原子数,称为体积掺杂浓度,符号 N_d ,下标 d 是 doping(掺杂)的首字母;二是晶体内杂质原子数与主体原子数的比值,称为相对掺杂浓度,符号 N_{rel} 。对于硅,体积掺杂浓度 N_d 与相对掺杂浓度 N_{rel} 的关系为

$$N_d = N_{\text{rel}} \times 5 \times 10^{22} / \text{cm}^3 \quad (1.1.1)$$

为使自由电子与空穴两种载流子数量差异极明显,体积掺杂浓度应当远远大于本征载流子浓度,对硅来说就是远远大于 $N_i = P_i \approx 1.4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ 。为不影响晶体原结构,体积掺杂浓度应当远远小于主体原子体积浓度,对硅来说就是远远小于 $5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ 。总之,对硅来说,体积掺杂浓度应当大致介于 $5 \times 10^{12} / \text{cm}^3 \sim 5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 之间,折合相对掺杂浓度 $N_d = 10^{-8} \% \sim 10^{-4} \%$,即百亿分之一到百万分之一之间。

相对掺杂浓度是在三维空间定义的。相对掺杂浓度达到上限百万分之一(即 10^{-6})时,在每个晶格方向上看,就是每 100 个主体原子才掺入一个杂质原子。

1) N 型半导体

往四价硅中掺入微量五价磷后电导率增大的原因是产生了带负电荷的自由电子。这种掺入五价元素后依靠自由电子导电的杂质半导体称为 N 型半导体(Negative-Type Semiconductor)。N 型半导体晶体的平面展开结构见图 1.1.2。

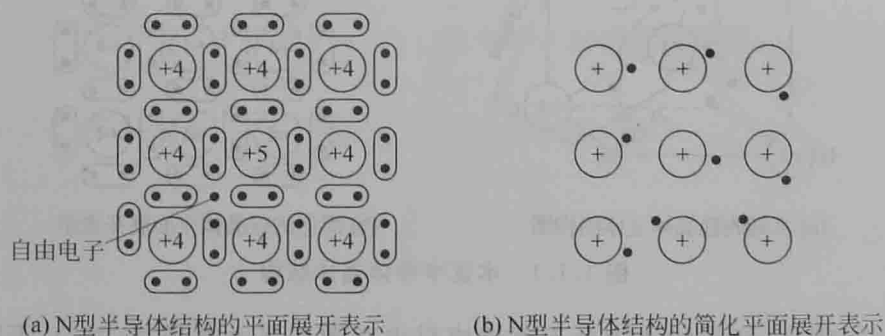


图 1.1.2 N 型半导体晶体结构及其简化画法

图 1.1.2(a)中的 +4 代表 4 个单位正电荷,标有 +4 的圆圈代表主体硅原子实,+5 代表 5 个单位正电荷,标有 +5 的圆圈代表杂质磷原子实。

图 1.1.2(b) 简化画法省略了所有主体原子, 只画出杂质原子。标有十号的圆圈代表失去一个电子的杂质离子——磷离子, 而黑点代表带 1 个单位负电荷的自由电子。

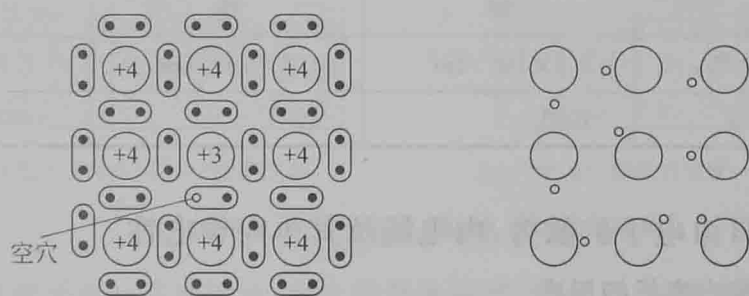
2) P 型半导体

三价元素原子外层电子个数为 3。在纯净的半导体材料硅中加入微量三价元素硼、铝或镓, 也不影响硅晶体结构。以掺入微量硼为例, 硼原子外层 3 个电子与相邻 3 个硅原子的外层价电子形成 3 个共价键, 相邻第 4 个硅原子周围缺少 1 个配对电子而出现 1 个空穴。空穴的存在为周围的电子挣脱共价键的束缚创造了客观条件, 电子会填补空穴。自由态下, 电子填补空穴是随机的, 空穴位置飘忽不定。在外加电压作用下, 电子会定向填补空穴。形式上看起来是空穴定向运动, 实质上是电子反向递补运动, 也能导电。

四价硅中掺入微量三价硼后电导率增大的原因是产生了空穴。这种掺入三价元素后依靠电子定向填补空穴而导电的杂质半导体称为 P 型半导体 (Positive-Type Semiconductor)。P 型半导体晶体的平面展开结构见图 1.1.3。

图 1.1.3(a) 中的 +4 代表 4 个单位正电荷, 标有 +4 的圆圈代表主体硅原子实, +3 代表 3 个单位正电荷, 标有 +3 的圆圈代表杂质硼原子实。

图 1.1.3(b) 简化画法省略了所有的主体原子, 只画出杂质原子。大圆圈表示三价杂质原子, 小圆圈表示空穴。



(a) P 型半导体结构的平面展开表示

(b) P 型半导体结构的简化平面展开表示

图 1.1.3 P 型半导体晶体结构及其简化画法

N 型半导体导电是依靠自由电子的连续运动, P 型半导体导电则是依靠电子依次填补空穴所形成的接力运动。P 型半导体导电过程就好像电子的接力赛跑。

3. 多数载流子与少数载流子

N 型半导体中不仅有大量自由电子, 由于热激发影响, 还有极微量空穴; 同样, P 型半导体中不仅有大量空穴, 还有极微量自由电子。N 型半导体中大量自由电子称为多数载流子, 极微量空穴称为少数载流子。P 型半导体中大量空穴称为多数载流子, 极微量自由电子称为少数载流子。多数载流子简称为多子, 少数载流子简称为少子。

半导体掺杂前后两种载流子浓度的乘积保持不变。本征载流子浓度为 $N_i = P_i$, 掺杂后每立方厘米中自由电子数变为 N_d , 空穴数变为 P_d , 则有

$$N_d P_d = N_i P_i = N_i^2 = P_i^2 \quad (1.1.2)$$

掺入浓度远大于 N_i 的五价杂质后形成 N 型半导体, 自由电子浓度 N_d 约等于所掺入的五价杂质浓度, 自由电子锐增, 空穴大量被填充, 空穴浓度 P_d 锐减。可由式 (1.1.2) 计算

杂质半导体空穴浓度 P_d 及其与自由电子浓度 N_d 的比值 P_d/N_d

$$P_d = N_i^2/N_d \tag{1.1.2a}$$

$$P_d/N_d = (N_i/N_d)^2 \tag{1.1.2b}$$

若 $N_i=1.4\times10^{10}/\text{cm}^3$, 掺入五价杂质浓度即自由电子浓度 $N_d=10^{15}/\text{cm}^3$, 则自由电子浓度与空穴浓度的比值锐增为

$$N_d/P_d = (N_d/N_i)^2 = [(10^{15}/\text{cm}^3)/(1.4\times10^{10}/\text{cm}^3)]^2 \approx 50\times10^8$$

就是说, 常温下掺杂浓度 $N_d=10^{15}/\text{cm}^3$ 时, N 型硅晶体中自由电子数是空穴的 50 亿倍。每 50 亿个自由电子, 才对应有一个空穴。同理, 常温下掺杂浓度 $P_d=10^{15}/\text{cm}^3$ 时, P 型硅晶体中空穴数是自由电子的 50 亿倍。每 50 亿个空穴, 才对应有一个自由电子。

可以看出, 杂质半导体中少子如此之少, 绝大多数情况下完全可以忽略不计。

少子越少, 半导体器件工作越好。理想半导体材料的少子应为 0。室温下温度升高 10°C , 硅本征半导体中自由电子和空穴数量 N_i 、 P_i 将加倍, 而杂质半导体中少子数量将增加为原先的 4 倍。由此判断, 本征半导体中自由电子和空穴原始量 N_i 、 P_i 越多, 所制成的半导体器件极限最高工作温度就越低。表 1.1.1 展示了室温 300K 下锗、硅、砷化镓半导体材料的本征载流子浓度及其所制成的半导体器件的极限最高工作温度。

表 1.1.1 室温 300K 下常见材料的 N_i 、 P_i 值及器件极限最高工作温度

材 料	锗	硅	砷化镓
本征载流子浓度 $N_i=P_i$	$2.4\times10^{13}/\text{cm}^3$	$1.4\times10^{10}/\text{cm}^3$	$1.1\times10^7/\text{cm}^3$
器件极限最高工作温度	100°C	250°C	450°C

1.1.2 PN 结自由电子扩散势、内电场及其单向导电性

1. 扩散势与 PN 结内电场的形成

N 型与 P 型半导体的结合体称为 PN 结。电子工程中 PN 结可用合金法或扩散法等工艺制成。PN 结刚形成时, 见图 1.1.4(a), N 区电子会经过界面移动到 P 区填充空穴。重物的下落是受到重力的作用, 电子的移动是受到电动势的作用。自由电子从 N 区移动到 P 区, 所受电动势称为扩散势或逃逸势, 用 E_e 表示, 其大小与材料及掺杂浓度有关。电子从 N 区移动到 P 区, 相当于把正电荷从 P 区推到 N 区, 故 E_e 极性为 P 正 N 负。

按照半导体物理原理, 室温下硅 PN 结自由电子扩散势(逃逸势) E_e 及其温度系数为

$$E_e = 0.119\lg N_d - 1.17\text{V} \tag{1.1.3}$$

$$\frac{dE_e}{dT} = 0.396\lg N_d - 8.17 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} \tag{1.1.4}$$

掺杂浓度为 $N_d=5\times10^{15}/\text{cm}^3$ 时, 由此计算室温下硅 PN 结逃逸势及温度系数各为

$$E_e = 0.119\lg(5\times10^{15}) - 1.17\text{V} = 1.868 - 1.17 \approx 0.7\text{V}$$

$$\frac{dE_e}{dT} = 0.396\lg(5\times10^{15}) - 8.17 \approx -2.0\text{mV}/^\circ\text{C}$$

硅 PN 结自由电子扩散势 E_e 及其温度系数与掺杂浓度的关系见表 1.1.2。

表 1.1.2 室温下硅 PN 结自由电子扩散势 E_c (正向压降) 及其温度系数

$\lg N_d$	12	14	15	16	17	18	19
E_c/V	0.26	0.50	0.62	0.73	0.85	0.97	1.09
$\frac{dE_c}{dT}/\frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$	-3.4	-2.6	-2.2	-1.8	-1.4	-1.0	-0.6

常温下晶格固定,原子不能活动。就好像电子是和尚,原子是庙,跑得了和尚跑不了庙。N 区电子跑到 P 区填充空穴后,原地留下正离子,在 N 区一侧形成正电荷区,在 P 区一侧形成负电荷区。P 区负电荷区与 N 区正电荷区组成 PN 结内电场,也叫空间电荷区。内建电势(势垒) U_b 的极性 N 正 P 负,与扩散势 E_c 方向相反,见图 1.1.4(b)。 U_b 削弱 E_c 的作用。内建电势 U_b 对电子迁移是阻力。最先迁移的电子形成势垒,阻止其他电子继续迁移。

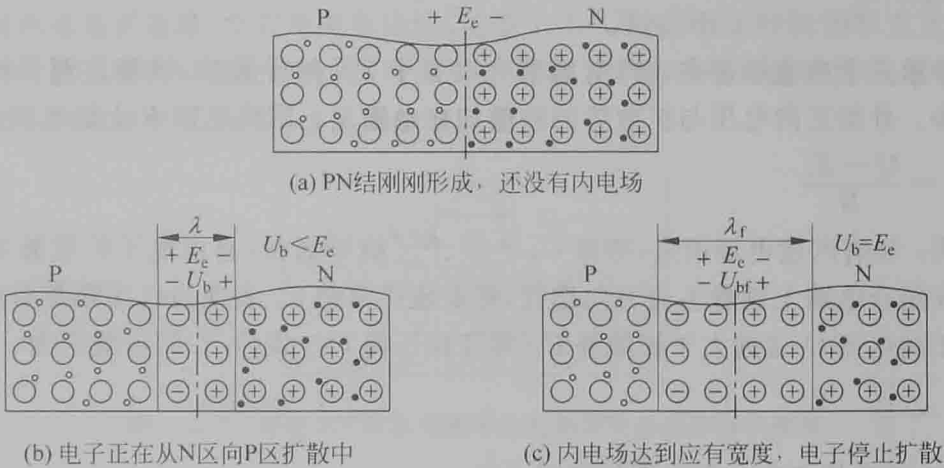


图 1.1.4 PN 结及其内电场的形成过程

随着 N 区电子向 P 区的运动,内电场越来越宽,势垒 U_b 越来越大。因此电子从 N 区到 P 区的扩散势头会很快减弱。当内电场增宽以致势垒 U_b 数值达到扩散势 E_c 时, $U_b = U_{bf} = E_c$,阻力与动力平衡,电子不再扩散,内电场正式稳定形成,见图 1.1.4(c)。总之,电子定向扩散会形成电场,而电场会阻止过分的扩散,于是扩散到一定程度即达成平衡。

无外力作用的 PN 结称为自由 PN 结,其内电场势垒用 U_{bf} 表示,宽度用 λ_f 表示。

2. 外加电压及光照对 PN 结内电场的影响

电源和光照对 PN 结都是外力。下面讨论电源和光照对 PN 结内电场的影响。

1) PN 结在外加电压下的表现

外加电压会改变 PN 结电子迁移动力、内电场与逃逸势的平衡及内电场的大小。

(1) PN 结在外加正向电压下的表现

电源正极接 P、负极接 N,称为 PN 结外加正向电压。外加正向电压 U 与逃逸势 E_c 极性相反,原始扩散动力由 E_c 降低为 $E_c - U$ 。动力小了,自由电子的迁移提前终止,PN 结内电场变窄,见图 1.1.5(a)。正向电压作用下 PN 结内电场宽度 λ_p 、势垒 U_{bp} 都变小。

外加正向电压数值达到扩散势时,PN 结内电场不复存在;外加电压继续增大,PN 结就会导通,见图 1.1.5(b)。PN 结内电场内建电势 U_{bp} 与外加正向电压 U 的关系如下:

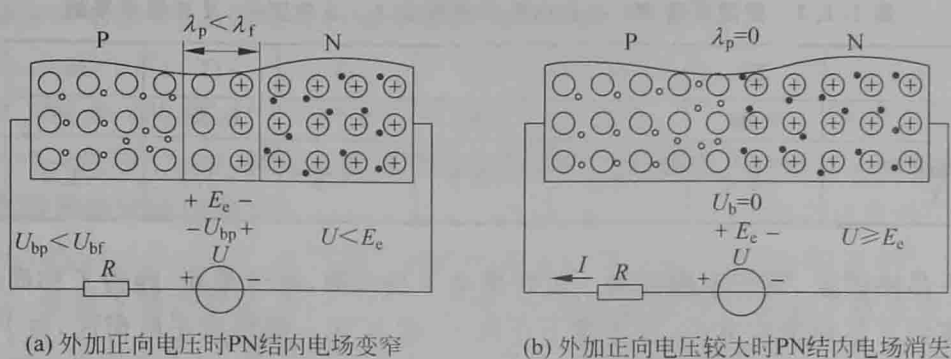


图 1.1.5 外加正向电压对 PN 结内电场的影响

$$U_{bp} = \begin{cases} E_c - U & (U < E_c) \\ 0 & (U \geq E_c) \end{cases}$$

扩散势独立于内电场存在。内电场消失以至于 PN 结导通后,线路只剩下外加正向电压和扩散势。外加正向电压与扩散势的差值加在电阻上。限流电阻 R 上的电流

$$I = \frac{U - E_c}{R} \quad (1.1.5)$$

这表明:只有内建电场消失(势垒 $U_b = 0$)、PN 结导通时,自由电子扩散势才能独立体现出来。在闭合电路上顺着电流方向巡行,可发现扩散势 E_c 表现为电压降落即正向压降。

外加正向电压 U 远远大于扩散势 E_c (即正向压降)时,式(1.1.5)可简化为

$$I \approx \frac{U}{R} \quad (1.1.5a)$$

(2) PN 结在外加反向电压下的表现

电源 U 正、负极各接 PN 结 N、P 极,称为外加反向电压。反向电压 U 与扩散势 E_c 方向相同。 U 与 E_c 对 N 区电子向 P 区的迁移都是动力。迁移动力大了,就会有更多的电子迁移,迁移就会延后终止,因此外加反向电压下 PN 结内电场 λ_n 变宽、势垒 U_{bn} 变大,见图 1.1.6(a)。

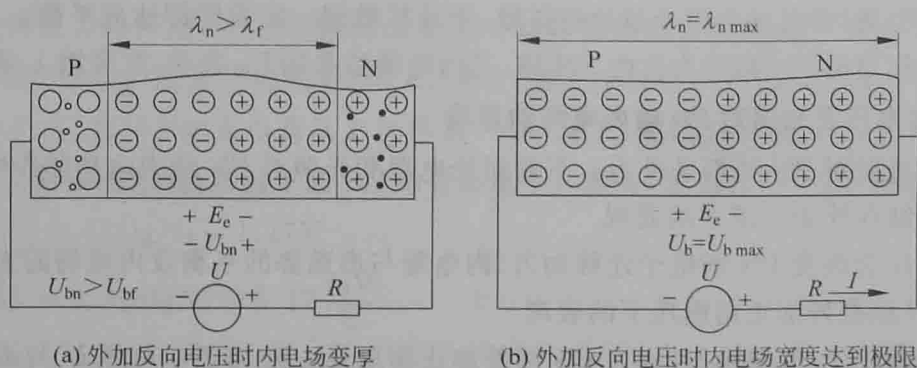


图 1.1.6 外加反向电压对 PN 结内电场的影响

外加反向电压较小时,内电场厚度随着外加反向电压数值增大而变大,呈现类似水涨船高的态势。PN 结在施加正向电压超过一定数值时导通,加反向电压时不导通,此即 PN 结的单向导电性。