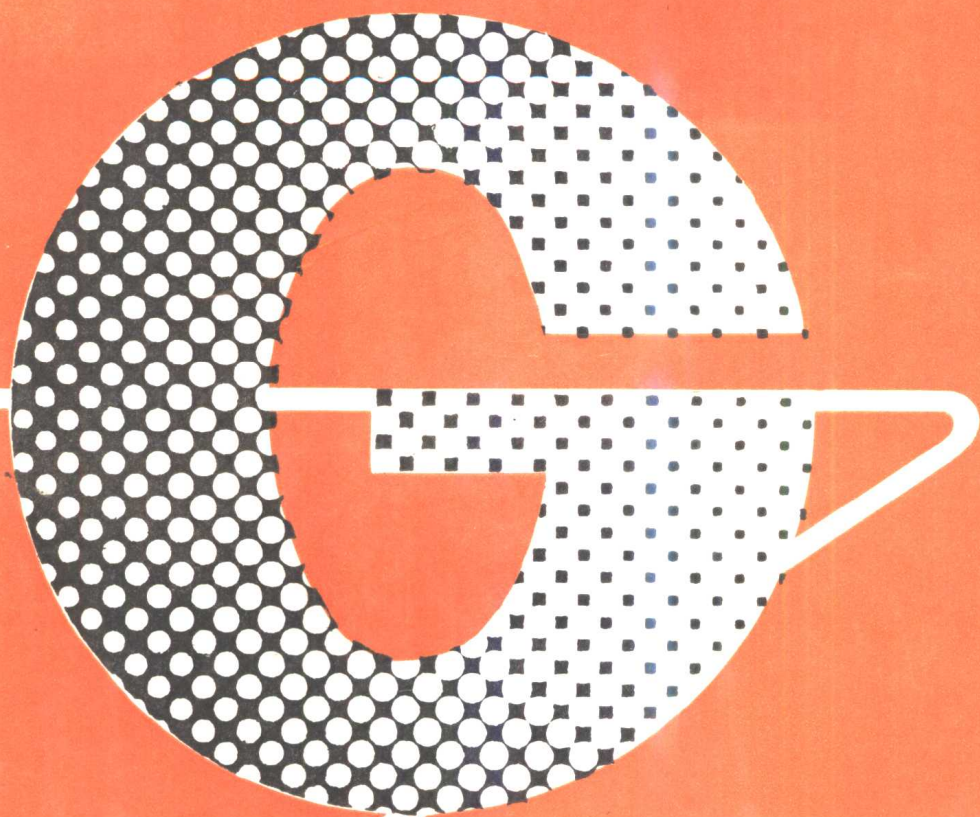


高等专科学校试用教材

模拟电子技术



南京机械专科学校 瞿祖庚 主编

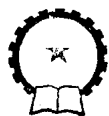
机械工业出版社

高等专科学校试用教材

模拟电子技术

南京机械专科学校 瞿祖庚 主编

1.5



机械工业出版社

本书是机械电子工业部高等专科学校电气工程专业教材编审委员会组织编写的教材之一，可作为三年制专科学校电气、电子类专业模拟电子技术课程（教学时数为60~75学时）的教材。

本书内容简明，文字精练，联系实际，突出重点。在阐明常用半导体器件的主要特性的基础上，重点论述了主要模拟电子电路的原理、性能与应用，以“分立为集成服务”的原则处理分立元件电路，增加集成电路的内容，以适应集成电路日益广泛的应用。本书配有较多例题与习题，起到扩大知识面、举一反三、启发思路、培养自学能力的作用。

本书正文分六章：半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、信号的运算与应用、信号的发生与直流稳压电源。本书附录中选编了若干补充内容可供选学。

本书也可作为成人高等学校以及技术培训教材，亦可供工程技术人员和业余爱好者阅读。

模 拟 电 子 技 术

南京机械专科学校 瞿祖庚 主编

*

责任编辑：任锐贞 版式设计：张世琴

封面设计：刘代 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $1/16$ ·印张 17 ·字数 412 千字

1991年10月北京第一版·1991年10月北京第一次印刷

印数 0,001—8,800 ·定价：4.80 元

*

ISBN 7-111-02825-2/TN·53 (课)

本书符号一览表

一、原则

1. 电流和电压 以基极电流为例

- I_B 大写字母、大写下标, 表示直流电流
- I_b 大写字母、小写下标, 表示交流电流有效值
- $\dot{I}_b$ 表示交流电流的复数量
- i_B 小写字母、大写下标, 表示含有直流电流的瞬时值
- i_b 小写字母、小写下标, 表示交流电流的瞬时值

ΔI_B 表示直流电流变化量

Δi_B 表示直流电流瞬时值的变化量

2. 电阻 大写下标表示线性电阻或直流电阻, 小写下标表示动态电阻。例如

- R_B 基极偏置电阻
- R_{b_0} 半导体三极管基极射极间的输入电阻

3. 电压放大倍数

- A_u 小写下标, 表示正弦交流信号的电压放大倍数
- $\dot{A}_u$ 上述放大倍数的复数量
- A_0 大写下标, 表示含有直流信号的电压放大倍数

二、符号

- A 电流单位安; 分立元件放大器的代号
- A 放大倍数
- α 二极管的正极(阳极)
- A_f 闭环放大倍数; 滤波器的传递函数
- A_{GF} 闭环互导放大倍数
- A_i 电流放大倍数
- A_{IF} 闭环电流放大倍数
- A_0 开环放大倍数
- A_P 功率放大倍数
- A_{RF} 闭环互阻放大倍数
- A_U 电压放大倍数
- A_{UC} 共模电压放大倍数
- A_{UD} 差模电压放大倍数

- A_{UP} 闭环电压放大倍数
- A_{u0} 负载开路时的电压放大倍数
- A_{us} 源电压放大倍数
- A_{usm} 中频区源电压放大倍数
- B 增益的单位贝; 通频带
- b 双极型三极管的基极; 场效应管的衬底
- BW 集成运算放大器组件的带宽
- c 二极管的负极(阴极); 双极型三极管的集电极
- C_{b_0} 三极管 b 、 c 间的极间电容
- C_{b_e} 三极管 b 、 e 间的极间电容
- C_i 放大电路输入端的电容
- C_L OTL电路的输出耦合电容; 晶振的负载电容
- C_o 放大电路输出端的电容
- d 场效应管的漏极
- E 直流电源电压
- e 双极型三极管的发射极
- E_B 基极回路直流电源电压
- E_C 集电极回路直流电源电压
- E_D 漏极回路直流电源电压
- E_E 发射极回路直流电源电压
- E_G 栅极回路直流电源电压
- F 反馈系数
- FET 场效应管
- f_C 单位增益带宽
- F_G 互导反馈系数
- f_H 放大电路的上限频率
- f_{Hf} 放大电路的闭环上限频率
- F_I 电流反馈系数
- f_L 放大电路的下限频率
- f_{Lf} 放大电路的闭环下限频率
- f_0 振荡频率
- f_{0max} 最大振荡频率
- f_{0min} 最小振荡频率
- f_P 并联谐振频率

F_R	互阻反馈系数	I_{ZM}	稳压管的最大稳定电流
f_S	串联谐振频率	I_{Zmin}	稳压管的最小稳定电流
f_T	三极管的特征频率	K_{CMR}	共模抑制比
F_U	电压反馈系数	MOS	绝缘栅型场效应管
f_β	三极管的截止频率	N	电子型半导体; 场效应管导电沟道之一, 集成运放的反相输入端, 集成运算放大器代号
g	场效应管的栅极	P	空穴型半导体; 场效应管导电沟道之一, 集成运放的同相输入端
G_{us}	源电压增益	P_C	集电极功率损耗
G_{usm}	中频区源电压增益	P_{CM}	集电极最大允许功率损耗
g_m	场效应管的低频互导	P_D	漏极功率损耗
$h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$ 或 $h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$	三极管的 4 个混合参数	P_{DM}	漏极最大允许功率损耗
I_A	直流电动机的电枢电流	P_E	功放电路中直流电源提供的功率
I_B	基极电流	P_{Emax}	功放电路中直流电源提供的最大功率
$I_{B'}$	三极管基区载流子复合电流	P_i	输入功率
I_{BS}	临界饱和基极电流	P_o	输出功率
I_C	集电极电流	P_{omax}	最大输出功率
i_C	电容电流	P_R	电阻器的额定功率
I_{CBO}	cb 间反向饱和电流	P_T	功放电路三极管的总功率损耗
I_{CEO}	基极开路时 ce 间的反向电流	P_{T1}	每个功放管损耗功率
I_{CM}	集电极最大允许电流	P_{ZM}	稳压管最大允许功率损耗
I_{CS}	集电极饱和电流	Q	品质因数
I_D	二极管电流; 漏极电流	QR	晶体谐振器
I_{DM}	漏极最大允许电流	R	电阻
I_{DSS}	场效应管的零偏漏极电流	R_B	基极偏置电阻
I_E	发射极电流	$R_{bb'}$	基区半导体电阻
I_F	二极管最大整流电流; 反馈电流	R_{be}	三极管基射间输入电阻
I_G	栅极电流	$R_{b'e'}$	三极管 be 结电阻
I_i	输入电流	R_C	集电极负载电阻
I_{IO}	集成运放的失调电流	R_{co}	三极管集射间输出电阻
I_L	负载电流	R_D	漏极负载电阻
I_{max}	最大电流	R_d	二极管动态电阻
I_N	集成运放反相输入端的电流	R_{ds}	场效应管漏源间输出电阻
I_{NC}	三极管集电区吸收载流子形成的电流	R_E	发射极电阻
I_O	输出电流	$R_{ee'}$	发射区半导体电阻
I_{Om}	输出电流峰值	R_F	反馈电阻
I_P	集成运放同相输入端的电流	R_G	栅极电阻
I_Q	三端集成稳压器的静态工作电流	R_{GS}	栅源直流电阻
I_R	基准电流	R_i	输入电阻
I_S	PN 结的反向饱和电流	R_L	负载电阻
I_{SC}	短路电流	R'_L	等效负载电阻
I_X	待测电流		
I_Z	稳压管电流; 稳压管的稳定电流		

R_o	输出电阻
R_P	电位器(其阻值为 R_P)
R_s	信号源电阻
R_S	源极电阻
R_T	热敏电阻(其阻值为 R_t)
R_x	待测电阻
R_z	稳压管的动态电阻
S	脉动系数; 稳定系数
s	源极
SR	集成运放的转换速率
U_B	基极对地电压
U_{BC}	三极管的基集电压
U_{BE}	三极管的基射电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时三极管集射间的击穿电压
$U_{(BR)DS}$	场效应管漏源间的击穿电压
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时三极管射基间的击穿电压
U_C	集电极对地电压; 电容电压; 控制电压
U_{CE}	三极管的集射电压
$U_{CE(sat)}$	三极管的集射饱和压降
U_D	漏极对地电压; 二极管的电压
U_{DS}	漏源电压
U_E	发射极对地电压
U_F	二极管正向导通电压; 反馈电压
U_G	栅极对地电压
U_{GD}	栅漏电压
U_{GS}	栅源电压
$U_{GS(off)}$	夹断电压
$U_{GS(th)}$	开启电压
U_i	输入电压
U_{IC}	共模输入电压
U_{ICR}	共模输入电压范围
U_{ID}	差模输入电压
U_{IDM}	最大差模输入电压
U_{IDmax}	运放在线性区中的最大差模输入电压
U_{IO}	输入失调电压

U_K	OTL电路中点对地电压
U_L	负载电压
U_N	运放反相输入端对地电压
U_O	输出电压
U_O^+	运放正饱和输出电压
U_O^-	运放负饱和输出电压
U_{OC}	开路电压; 共模信号输出电压
U_{OD}	差模输出电压
U_{Om}	输出电压峰值
U_{OPP}	运放最大输出电压幅度
U_P	运放同相输入端对地电压
U_R	基准电压
U_{RM}	二极管最高反向工作电压
U_s	信号源电压; 源极对地电压
U_T	温度电压当量
U_x	待测电压
U_z	稳压管的稳定电压
X	电抗
X_d	偏差信号
X_f	反馈信号
X_i	输入信号
X_o	输出信号
Z	复阻抗
$ Z $	阻抗
α_z	稳定电压的温度系数
β	直流电流放大系数(共射)
$\bar{\beta}$	交流电流放大系数(共射)
γ	纹波系数
Δ	增量
δ	相对误差; 脉冲占空比
η_{max}	最大效率
θ	导通角
φ_a	放大器的相移
φ_f	反馈网络的相移
ω_0	滤波器的截止角频率

注: I_B 、 I_C 、 I_D 、 U_{BE} 、 U_{CE} 、 U_{DS} 、 U_{GS} 等加上下标Q表示静态值。

前 言

本书是机械电子工业部高等专科学校电气工程专业教材编审委员会组织编写的教材之一，可作为三年制专科学校电气、电子类专业模拟电子技术课程（教学时数为60~75学时）的教材，编写时参照了国家教委组织制订的高专科学校电子技术基础课程教学基本要求（征求意见稿）。

由于电子技术内容非常广泛，而教学时数不多，因此本书力求精选内容、文笔简练、联系实际、突出重点。本书的重点是基本电路的分析与应用。在阐述半导体器件时，简明扼要地阐述常用半导体器件的主要特性，以能合理地选择与正确地使用常用半导体器件，而对于器件的内部导电机理仅作扼要的阐述，对于集成组件的内部电路在正文中不作介绍（仅在附录中介绍了一些组件的内部电路以供参考）。对于形式繁多的模拟电子电路，本书着重阐明常见的典型电路的工作原理与分析方法，并在例题与习题中适当介绍一些其他形式的电路，试图做到启发读者思路，培养自学能力。鉴于集成电路的飞速发展，本书尽量突出集成电路的内容，以“分立为集成服务”的原则来处理必要的分立元件电路的内容。本书各章后均配有一定数量的复习思考题与练习题，起到巩固基本概念、扩大知识面、举一反三的作用。书后备有附录。附录一中选编了若干补充内容，如专业需要或教学时数较多，可选学其中一些内容。附录二至附录九为常用半导体器件的主要参数。

本书的编者为南京机械专科学校瞿祖庚（主编）、哈尔滨机电专科学校刘仁宇和长沙有色金属专科学校薛万程。瞿祖庚编写了绪论、第二章、第五章和§6-1、§6-5；薛万程编写了第一章、§6-2、§6-3、§6-4和附录一中WA7型集成稳压器的内部电路；刘仁宇编写了第三章、第四章和附录一的其他内容。附录的其他内容由各有关编者选编。主编对全书作了修改、定稿工作。

南京金陵职业大学吉健（主审）、南京电力专科学校阎德仁 and 上海冶金专科学校汤蕾审阅了本书的初稿，提出了许多宝贵意见与建议，很多兄弟学校的老师参加了本书编写提纲的讨论或审阅，本书编写过程中得到了编审者所在学校领导的大力支持，值此成书之日，谨向上述各方面的老师和领导表示深切的谢意。

本书除作专科学校教材之外，还可作为各类成人高校和技术人员培训教材，也可供工程技术人员和业余爱好者阅读。

为了适应专科的教学要求，本书编者力图在教材体系与具体阐述方法上都具有一定特色，但由于编者教学经验的局限性和学识水平的限制，书中错误和不妥之处在所难免，编者以期待的心情恳请读者给予批评和指正。

编者

1990年3月

目 录

绪论	1
第一章 半导体器件	3
§ 1-1 半导体基础知识	3
一、半导体	3
二、P型半导体和N型半导体	3
三、PN结和它的单向导电性	4
小结	6
§ 1-2 半导体二极管	6
一、半导体二极管的结构	6
二、半导体二极管的特性	7
三、二极管的电路模型与含二极管电 路的计算	8
四、半导体二极管的主要参数	10
小结	10
§ 1-3 硅稳压管	10
一、硅稳压管的伏安特性及电路模型	10
二、稳压管的主要参数	11
小结	12
§ 1-4 半导体三极管	12
一、三极管结构简介	12
二、三极管内电流的分配关系	13
三、三极管的工作状态	16
四、三极管的特性曲线	18
五、三极管的主要参数	21
小结	23
§ 1-5 场效应管	23
一、N沟道增强型绝缘栅场效应管的 结构与基本工作原理	24
二、N沟道增强型MOS管的特性 曲线	25
三、耗尽型MOS管	26
四、结型场效应管	27
五、场效应管的主要参数	29
六、使用MOS管的注意事项	30
小结	30
思考题与习题	30

第二章 基本放大电路	36
§ 2-1 放大电路的工作原理	36
一、静态时的放大电路	37
二、动态时的放大电路	37
三、放大电路中各元件的作用	40
小结	41
§ 2-2 放大电路的失真	41
一、放大电路的动态工作情况	41
二、放大电路的失真问题	43
三、最大不失真输出电压	46
小结	47
§ 2-3 放大电路的分析	47
一、放大电路的静态分析	47
二、放大电路的动态分析	49
小结	60
§ 2-4 静态工作点的稳定及分压式 射极偏置的放大电路	60
一、静态工作点的漂移	60
二、分压式射极偏置放大电路中静态 工作点的稳定	61
三、分压式射极偏置放大电路的静态 分析	63
四、分压式射极偏置放大电路的动态 分析	65
五、多级放大器	66
小结	67
§ 2-5 共集电极放大电路	67
一、射极输出器的静态分析	68
二、射极输出器的动态分析	68
三、射极输出器的应用	72
小结	74
§ 2-6 共基极放大电路及与共射极、 共集电极放大电路的比较	74
一、共基极放大电路的静态分析	74
二、共基极放大电路的动态分析	75

IV

三、共射极、共集电极、共基极放大 电路的比较	76
小结	77
§ 2-7 场效应管放大电路	78
一、分压式偏置放大电路	78
二、自给偏压放大电路	80
小结	81
§ 2-8 放大电路的频率响应	82
一、低频响应	83
二、高频响应	86
三、通频带	91
四、频率失真	92
小结	93
思考题与习题	93
第三章 集成运算放大器	100
§ 3-1 概述	100
§ 3-2 直接耦合放大器的特殊问题 ——零点漂移	102
小结	103
§ 3-3 差动放大电路	103
一、差动放大电路的基本形式	103
二、射极耦合差动放大电路 (长尾电路)	106
三、具有恒流源的差动放大电路	109
四、差动放大电路的输入、输出接线 方式	115
小结	118
§ 3-4 直接耦合功率放大器	118
一、概述	118
二、双电源互补对称电路	119
三、单电源互补对称电路	121
四、集成功率放大器	125
小结	126
§ 3-5 集成运算放大器的两种基本 输入方式	127
一、集成运算放大器的主要参数	127
二、理想运算放大器	129
三、集成运算放大器的两种基本电路	130
四、实际组件的运算误差	133
小结	135
§ 3-6 放大器中的负反馈	136

一、反馈的基本概念	136
二、负反馈放大器的方块图及基本关 系式	140
三、负反馈对放大器性能的影响	142
四、深度负反馈放大器放大倍数的 估算	144
五、负反馈放大器的自激及其消除	147
小结	148
思考题与习题	149
第四章 信号的运算与处理	158
§ 4-1 基本运算电路	158
一、变号运算电路	158
二、加法运算电路	158
三、减法运算电路	160
四、积分运算电路	161
五、微分运算电路	162
六、对数和反对数运算电路	163
小结	167
§ 4-2 电压电流转换器	167
一、电压-电流转换器	167
二、电流-电压转换器	170
小结	171
§ 4-3 信号处理电路	171
一、线性整流器	171
二、有源滤波器	172
三、采样-保持电路	176
四、电压比较器	177
小结	181
§ 4-4 集成运算放大器使用时的 几个具体问题	181
一、调零	181
二、自激振荡的消除	183
三、保护措施	183
四、集成运算放大器性能的扩展	184
小结	186
§ 4-5 集成运算放大器的应用 实例	186
一、双限温度自动控制器	186
二、直流电动机脉宽调速系统	187
思考题与习题	189
第五章 信号的发生	196

§ 5-1 正弦信号发生器的基本		
原理	196	
一、正弦振荡条件	196	
二、起振和限幅	196	
三、选频	197	
小结	197	
§ 5-2 RC正弦波振荡器	197	
一、RC串并联选频网络	197	
二、RC串并联振荡器	199	
三、RC桥式振荡器	200	
小结	201	
§ 5-3 LC正弦波振荡器	201	
一、互感耦合式振荡器	202	
二、电感三点式振荡器	203	
三、电容三点式振荡器	204	
小结	206	
§ 5-4 晶体振荡器	206	
一、石英晶体振荡器	207	
二、并联式和串联式石英晶体振荡器	208	
小结	209	
§ 5-5 非正弦波发生器	209	
一、方波发生器	209	
二、三角波发生器	210	
三、锯齿波发生器	212	
小结	212	
思考题与习题	212	
第六章 直流稳压电源	221	
§ 6-1 整流与滤波	221	
一、单相桥式整流电路	221	
二、滤波	223	
小结	226	
§ 6-2 硅稳压管稳压电路	227	
一、硅稳压管稳压电路的工作原理	227	
二、硅稳压管稳压电路的计算	229	
小结	231	
§ 6-3 串联型稳压电路	231	
一、串联型稳压电路的组成及稳压原		
理	231	
二、串联型稳压电路的改进	233	
小结	234	
§ 6-4 集成稳压器	235	
一、输出固定电压	235	
二、提高输出电压	235	
三、扩大输出电流	236	
小结	236	
§ 6-5 开关型稳压电源	236	
一、开关型稳压电源工作原理	237	
二、自激控制式开关型稳压电源	237	
小结	238	
思考题与习题	238	
附录	242	
附录一 若干补充内容	242	
1. 变压器耦合功率放大器	242	
2. 光电半导体器件简介	244	
3. $\mu A741$ 集成运算放大器内部电路	245	
4. $WA7$ 型多端可调集成稳压器内部		
电路	247	
附录二 半导体器件型号命名方法		
(摘自国家标准GB249—74)	250	
附录三 常用电阻器、电容器的		
主要性能参数	251	
附录四 常用二极管的主要参数	253	
附录五 常用硅单相桥式整流器的		
主要参数	254	
附录六 常用硅稳压管的主要参数	254	
附录七 常用三极管的主要参数	255	
附录八 常用集成运算放大器的		
主要参数及接线图	258	
附录九 常用集成稳压器的		
主要参数	262	
参考文献	263	

绪 论

电子技术是当代迅速发展的学科。它在各个领域中的应用日益广泛。电子技术的应用可以归纳为四个方面,即

(1) 通讯 电子技术最初应用于通讯,并迅速发展。当代卫星通讯、遥感遥测等方面的成就实际上就是把人类的视力和听力扩大了无数倍。

(2) 控制 现代化工厂可以利用电子技术使机器有条不紊地自动工作,很多人类无法生存的环境(例如高温、水下、有毒气体的环境)中,可使机器人代替人类工作,好比使人类的双手变得无比奇妙。

(3) 计算机 人类发明的电子计算机可以帮助人们进行脑力劳动。

(4) 文化生活 电视机、录音机、录象机、电子玩具和教具等已成为人类生活中不可缺少的设备。

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。

电子器件包括电子管与离子管、半导体管(也称晶体管)、集成电路。

电子管与离子管是电子器件的第一代。目前,虽然在很多特殊的场合中电子管与离子管还在应用,但多数场合已由半导体器件取代。所以,本书中不讨论电子管与离子管,只讨论半导体管和集成电路。

将各个单个的半导体管和电阻、电容、电感等元件连接起来组成的电路称为分立的电子电路。现在已能把许多半导体管和阻容元件等做在同一块硅晶片上,这样组成的电子电路称为集成电路(integrated circuit,缩写为IC)。集成电路体积小、重量轻、功耗低、工作可靠、价格低,所以应用非常广泛。

集成电路可分为小规模、中规模、大规模和超大规模的集成电路。目前的超大规模集成电路中,在面积为几十平方毫米的硅片上可集成上百万个元件。集成电路的出现使电子电路的体积大为缩小,使用非常方便,也促进了电子技术的发展。

电子电路就是包含电子器件的电路。

按照信号的形式,电子技术可分为模拟电子技术和数字电子技术。如果电子电路中信号是连续变化信号(例如正弦波),则属于模拟电子技术;如果电子电路中信号是跃变的脉冲式信号(例如矩形波),则属于数字电子技术。

高等工业专科学校电类专业都必修模拟电子技术和数字电子技术这两门课(或合称电子技术基础),它们是电子技术入门性质的基础技术课程。模拟电子技术与数字电子技术课程中主要讲述电子技术中最基本的内容。具体地说,基本理论是电子电路的原理与分析方法;基本知识是电子器件和电子电路的性能与应用;基本技能是电子电路的实验能力、运算能力和读图能力。

必须说明,本书的重点放在电子电路的分析上,对于电子器件,则着重介绍它们的外部特性与使用知识,对于其内部结构和物理过程,只作扼要的介绍。

下面谈谈怎样学好本课程。本课程既然是工程方面的基础技术课,读者在学习中就要充

分注意它的理论性与实践性。

本课程是入门性质的技术课程，所以在教学中会遇到很多基本概念和基本原理。首先要正确而牢固地建立基本概念，切忌似懂非懂地放过去，以致问题越积越多。只有基本概念清楚，才有可能弄清本课程的基本原理。电工基础课程是本课程的基础，学好电工基础是学习本课程的必要条件。

本课程是工程技术方面的课程，所以还要注意它的实践性。这里要着重强调两个观点：工程观点和实验观点。

先说工程观点。电子器件的特性是非线性的，所以电子电路是非线性电路，要精确计算电路中的电流（电压）是比较复杂的。同时因为：（1）由于工艺上的原因，电子器件的特性有一定的离散性，即同一型号的电子器件其特性并非完全一致，手册上给定的特性参数只是参考值。（2）电路中的电阻、电容等元件的参数只是标称值，其实际值不一定正好等于标称值。如通常应用的炭膜电阻，其阻值允许有 $\pm 10\%$ 的误差，因此标称值为 $1\text{k}\Omega$ 的电阻，其实际阻值在 $0.9\text{k}\Omega \sim 1.1\text{k}\Omega$ 之间。（3）元器件的特性会受到环境温度的影响，元器件的老化也会使特性有所变化，所以电子电路中的电流和电压会随着温度和时间而变动。考虑到上述几个原因，以及为了简化计算，故提倡用近似计算或称工程估算法。

例如， $1\text{k}\Omega$ 电阻和 $10\text{k}\Omega$ 电阻并联，其等效电阻值应为 $0.909\text{k}\Omega$ ，如允许有 10% 左右的误差，则近似地认为 $1\text{k}\Omega$ 电阻与 $10\text{k}\Omega$ 电阻并联的等效电阻值为 $1\text{k}\Omega$ ，可使计算大为简便。概括起来就是：在估算两个电阻（ $R_1 \parallel R_2$ ）的并联等效电阻值时，如 $R_1 \ll R_2$ ，则并联等效电阻值 $R_1 \parallel R_2 \approx R_1$ 。

再如，按照 $I = \frac{E - U_F}{R}$ 计算电流时，如果 $E \gg U_F$ ，则可以认为 $I \approx \frac{E}{R}$ 。当然如果与 E 相比， U_F 并不很小，则不应加以忽略。

电子设备（装置）的产生过程是：根据基本原理拟定电路结构（定性分析过程），确定各元器件的参数（定量估算过程），安装完成后通过调试使电路的工作情况符合设计要求。由此可见，定性分析、定量估算和安装调试三者对于电子技术人员来说具有同样的重要意义。所以，电子技术人员除了掌握电子技术基本理论以外，还应具有较强的实验能力。通过电子实验和课程设计，学会使用常用的电子仪器和查阅电子器件手册，学会调试测量电子电路的基本方法，并且深化对电子技术基本理论的理解，开拓思路，对于学好电子技术基础课程是十分重要的。

第一章 半导体器件

§ 1-1 半导体基础知识

一、半导体

要理解半导体器件的工作原理和特性，就要了解半导体的导电性能。半导体与金属在导电性能方面的差异很大。从表1-1可见，纯净硅的电阻率比银和铜的约大上千亿倍。

表1-1 温度为300 K时几种材料的电阻率/($\Omega \cdot m$)

导 体		半 导 体	
银 Ag	铜 Cu	锗 Ge	硅 Si
1.6×10^{-8}	1.67×10^{-8}	0.46	2300

为什么导体和半导体的导电性能会有这样大的差异呢?这是由于银和铜等金属导体的价电子很容易从原子中脱离出来，成为带负电的自由电子。在电场作用下，自由电子作定向运动形成电流，所以金属导体中自由电子是载流子。锗和硅的每个原子有4个价电子，分别与晶体中4个相邻原子中的价电子组成共价键。这些价电子需要获得足够大的能量，才能从原子中挣脱出来成为自由电子，所以自由电子是半导体中的一种载流子。除此之外，半导体中还有一种载流子——空穴。当电子从共价键中挣脱出来成为自由电子后，在共价键中留下了一个空位。邻近共价键中某些价电子就可能过来填补这个空位，而使空位由原来的位置转移到新的位置上，这样就形成了空位运动。显然空位的运动方向与价电子填补空位的运动方向相反，所以一个空位的运动相当于一个带正电的载流子的运动。这种载流子称为空穴，所带正电荷量等于电子的负电荷量（其值相等，但正、负不同）。在同一电场作用下，空穴和自由电子的运动方向相反，而它们形成的电流方向相同。

纯净的半导体在一定温度下，由于热能的激发，有些价电子获得足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子并产生了空穴。因为载流子的急剧增加，使半导体的电阻率大为降低。同样，光能辐射时，也能使半导体的电阻率降低。利用这个特点，可以制成热敏和光敏半导体器件。

纯净半导体也称为本征半导体。本征半导体中由于热、光等原因使自由电子和空穴成对地出现，这种现象称为本征激发。

本征激发产生了电子空穴对，同时电子和空穴也会相遇复合而成对地消失。单位时间内激发的载流子数越多，半导体中载流子浓度越大，电子空穴相遇的机率也越高，则单位时间内复合消失的载流子数也越多。最后达到动态的平衡，即单位时间内激发和复合的载流子数相等，载流子浓度就不再增大。一定的温度下有一定的载流子浓度。

二、P型半导体和N型半导体

若在本征半导体中，掺入微量的其它元素（杂质），就可以明显地降低电阻率。这样的

半导体，称为掺杂半导体。掺入的杂质可以是五价的磷（P）、砷（As）等，也可以是三价的硼（B）、镓（Ga）等，分别制成N型半导体或P型半导体。

1. N型半导体

如果在硅（或锗）单晶体中掺入微量的五价杂质原子，例如磷，这样每个磷原子同相邻的4个硅原子组成共价键时，多出一个受磷原子核束缚很弱的价电子。在常温下，这个价电子就可挣脱磷原子核的束缚成为自由电子，这时磷原子因少了一个价电子而成为正离子。由于磷原子在硅晶体中给出一个多余电子，故称磷为施主杂质。因此，掺入五价杂质元素的硅晶体中将有较多的自由电子。这种半导体主要靠自由电子导电，所以叫做电子型半导体，简称N型半导体。同时由于本征激发在半导体中还产生了电子—空穴对。所以，在N型半导体中，不但有数量较多的自由电子，也有少量的空穴存在。也就是说，电子是多数载流子（简称多子），空穴是少数载流子（简称少子）。

在N型半导体中，正离子数与空穴数之和等于自由电子数，保持电中性。另外正离子处于晶格位置上，不能作定向运动，因而半导体中离子不是载流子。

2. P型半导体

如果在硅（或锗）单晶体中掺入微量的三价杂质原子，例如硼，这样每个硼原子同相邻的4个硅原子组成共价键时，其中一个键上缺少一个电子，形成一个空位，邻近硅原子中的价电子就可填补这个空位，并形成空穴。硼原子核因多了一个价电子成为负离子。因此，掺入硼杂质的硅晶体中具有较多的空穴。硼原子在硅晶体中可接受一个电子，故称硼为受主杂质。这种半导体主要靠空穴导电，所以叫做空穴型半导体，简称P型半导体。同时由于本征激发在半导体中还产生了电子—空穴对。因此，在P型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。当然，负离子数与自由电子数之和等于空穴数。

综上所述，在本征半导体中，掺入适量的有用杂质后，使半导体的导电性能大大地增强，由此获得所需要的N型半导体或P型半导体，用来制作各种半导体器件。

三、PN结和它的单向导电性

在本征半导体中掺杂，目的不仅在于改变电阻率，更主要的是为了制成PN结。在一块半导体单晶芯片上，用掺杂质的方法制成具有P型和N型两个区域，它们的交界处就形成了PN结。在PN结的基础上可制成半导体二极管、三极管、集成电路等各种半导体器件。

1. PN结的形成

由于P区一侧多子空穴的浓度比N区一侧少子空穴的浓度大得多，而N区一侧多子自由电子的浓度比P区一侧少子自由电子的浓度大得多，这种浓度的差异使得各区的多子越过交界面向对方扩散。这样，在P区靠近交界面处形成一个缺少空穴只剩下负离子的薄层；同理，在N区靠近交界面处形成一个缺少电子的正离子薄层，这两个薄层区域称为空间电荷层，如图1-1所示。

空间电荷层的宽度一般只有零点几微米，由于这个薄层内缺少载流子，所以也叫做耗尽层。

在空间电荷层中，靠近N区一侧带正电荷，靠近P区的一侧带负电荷，就象平板电容器一样，在其间形成电场，称为内电场。内电场是阻碍多子扩散运动的，所以空间电荷层又象一个壁垒，故空间电荷层又称为势垒层。只有获得足够能量的多子，才能克服势垒越过界面。这就是说，扩散的结果建立了它的对立面——阻止多子继续扩散的内电场。

实际上,在内电场作用下,少子将越过交界面向另一侧运动。这种在电场作用下载流子的定向运动称为漂移运动。随着多子扩散运动的进行,出现了内电场及少子的漂移运动。最后,单位时间内扩散的载流子数与漂移的载流子数相等,即扩散电流等于漂移电流时,呈现出动态平衡。动态平衡时的PN结中扩散电流与漂移电流相抵消,净电流为零。

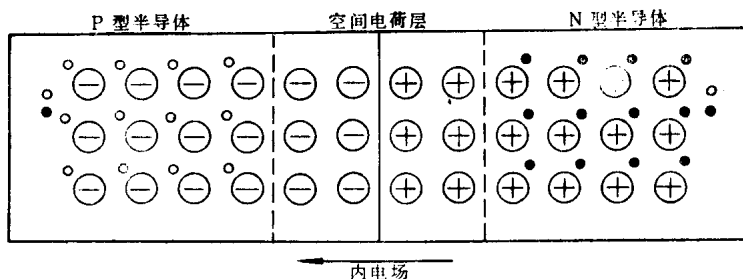


图1-1 PN结的示意图

“●”和“○”分别代表电子和空穴
“⊕”和“⊖”分别代表正离子和负离子

2. PN结的单向导电性

PN结中势垒的存在,使它具有有一种特殊性能——单向导电性,即加上不同极性的电压时,通过PN结的电流明显不同。

(1) 正向偏置 图1-2 a 为PN结加正向电压时的情况,此时P区电位高于N区。这种情况称为正向偏置(简称正偏)。由于外加电场的作用,使空间电荷层变薄(由1-1变到2-2),内电场被削弱,多子的扩散运动得到加强,电路中形成了较大的正向电流,PN结呈现导通状态。

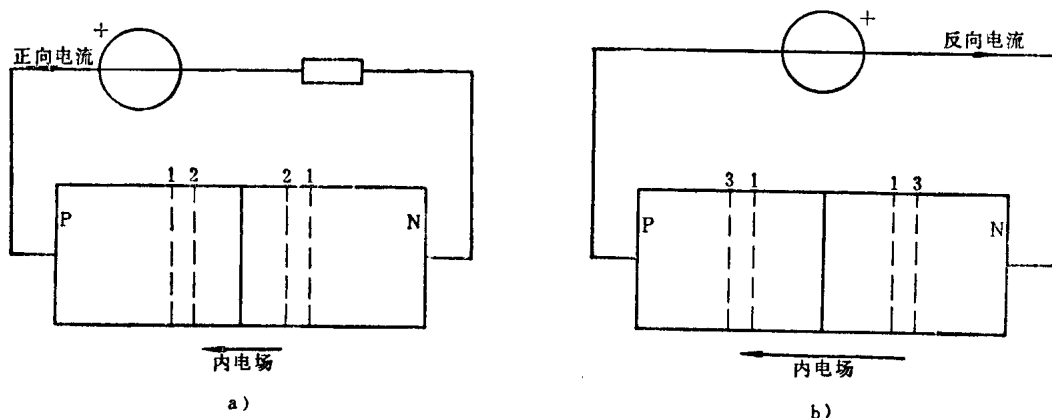


图1-2 PN结外加电压

a) 加正向电压时的情况 b) 加反向电压时的情况

(2) 反向偏置 图1-2 b 为PN结加反向电压时的情况(简称反偏),此时P区电位低于N区。由于外电场的作用,使空间电荷层展宽(由1-1变到3-3'),内电场增强。反偏使多子扩散难以进行,而少子漂移占了优势。因此,外电路中形成反向电流。由于少子为本征激发所致,其浓度很小,所以反向电流比正向电流小得多,PN结呈现为截止状态。在一定的温度下,不需很大的电压,少子就全部参与导电,故反向电流几乎不再随电压增大而变大,因此反向电流又称反向饱和电流。另外,反向电流与温度有关,温度上升时,反向电流剧增。

3. PN结的电流与电压关系方程式

上面定性地讲解了PN结的单向导电性,为进一步了解电流与电压的确切关系,还必须引出描述这种关系的方程式。由半导体理论分析可得出下式

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

式中 I ——PN结的电流,单位为A;

I_s ——反向饱和电流,单位为A;

U ——外加电压,单位为V;

U_T ——温度的电压当量,在室温下 $U_T \approx 0.026\text{V}$ 。

由式(1-1)可知:

(1) 当 $U = 0$ 时, $I = 0$;

(2) 当 U 为正值,且 $U \gg U_T$ 时,

$$I \approx I_s e^{\frac{U}{U_T}}$$

此种情况下, I 随 U 按指数规律激增;

(3) 当 U 为负值,且 $|U| \gg U_T$ 时

$$I \approx -I_s$$

可见PN结反偏时,只流过很小的反向饱和电流。

小 结

1. 半导体的导电性能介于导体与绝缘体之间。温度、光辐射等的激励可使它的电阻率减小。掺杂也可使半导体的电阻率大大减小。

2. 半导体中有两种载流子。在P型半导体中,空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子;在N型半导体中,自由电子是多数载流子,空穴是少数载流子。

3. 多子浓度由掺杂浓度决定;少子浓度由温度决定。

4. 在半导体芯片上,用掺杂的方法制成P区和N区,它们的交界处形成PN结。PN结具有单向导电性;正偏时,可通过较大的正向电流;反偏时,只能通过极小的反向电流。

§ 1-2 半 导 体 二 极 管

一、半导体二极管的结构

半导体二极管是由一个PN结加上相应的引出线和管壳制成的。它的图形符号如图1-3 d所示。

根据半导体二极管的不同结构,可将其分为三种类型。图1-3中画出了三种类型二极管结构的示意图。它们都有两个电极,从P型半导体引出的是正极,从N型半导体引出的是负极。

将一根含有“杂质”的细金属丝和一块半导体晶片的表面相接触,然后通过很大的瞬时电流,使触丝和半导体牢固地熔接在一起,部分杂质原子掺入到晶片,构成PN结,再做出相应的电极引线,外加管壳密封,就成为点接触型二极管,如图1-3 a所示。点接触型二

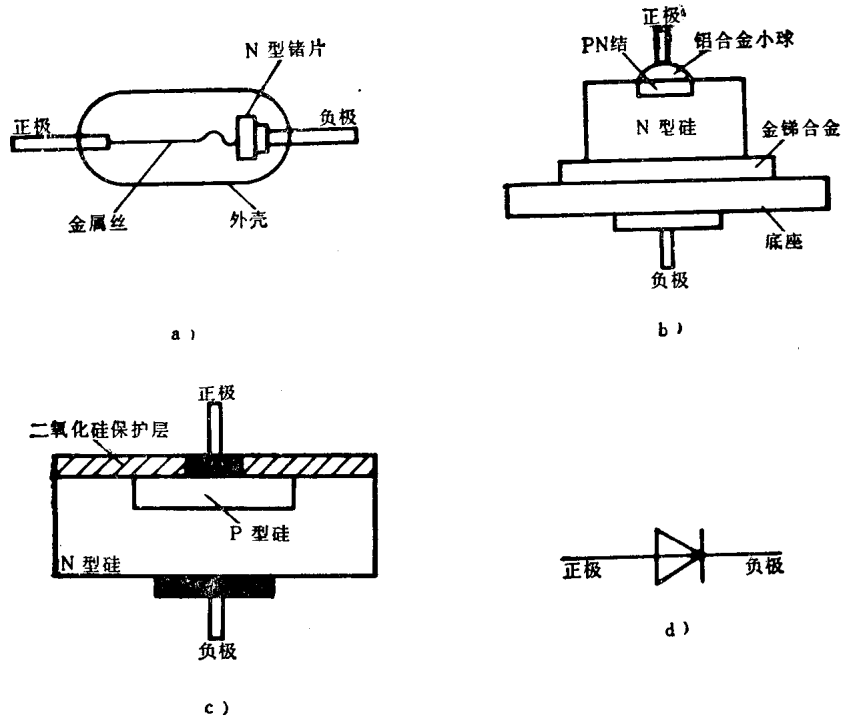


图1-3 半导体二极管的结构及符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型 d) 图形符号

极管金属丝很细，形成的PN结面积很小，所以其极间电容很小，但它不能承受高的反向电压和大的电流。这种类型的管子适用于高频检波和用作脉冲数字电路中的开关元件，也可用作小电流整流。如2AP1是点接触型锗二极管，最大整流电流为16mA，最高工作频率是150MHz。

面接触型（或称面结型）二极管的PN结是合金法或扩散法制成的，其结构如图1-3b所示。面接触型二极管的PN结面积大，可承受较大的电流，但其极间电容也大。这种类型的管子适用于整流，而不宜用于高频电路中。如2CP1是面接触型硅二极管，最大整流电流为400mA，最高工作频率只有3kHz。

平面型二极管的结构如图1-3c所示。结面积较小的平面型二极管，其结电容较小，适用于脉冲数字电路中；结面积较大者可以通过较大的电流，适用于大功率整流电路。

根据半导体二极管材料的不同，可分为硅二极管和锗二极管。

二、半导体二极管的特性

二极管最主要的特性就是单向导电性，可以用伏安特性曲线说明。所谓伏安特性曲线就是电压与电流的关系曲线，如图1-4所示。

由于二极管引出线及半导体存在的电阻以及表面漏电流等因素的影响，实测所得的二极管伏安特性与式(1-1)有些差别。

二极管的伏安特性曲线可以分为下列四个区域：

1. 死区

当二极管的正向电压很小时，几乎没有电流通过二极管。正向电压超过某一数值后，才