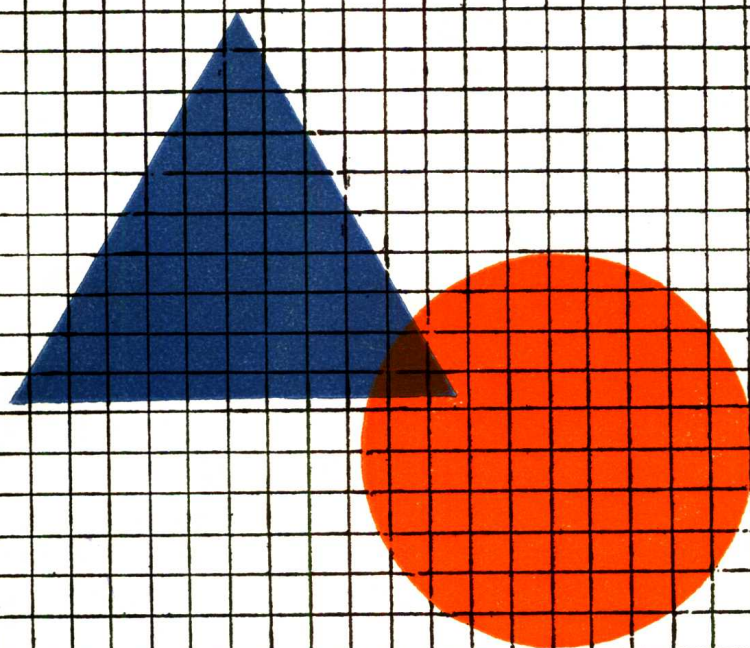


高等学校试用教材

电子技术基础

王至正 朱汉荣 肖福坤 赵继德 合编



高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据原教育部一九八二年九月在镇江召开的师专物理专业教学大纲审订会通过的《电子技术基础教学大纲》精神编写的。

全书内容理论部分共分八章：晶体管原理、低频放大器(包括晶体管放大器基础、负反馈放大器、功率放大器)、常用放大器(包括直流放大器、运算放大器和调谐放大器)、直流稳压电源、正弦波振荡器、无线电通讯与晶体管收音机、脉冲与数字电路、电视。书中每章均附有适量的思考题和习题。实验部分包括十七个实验内容和常用电子仪器介绍。

本书可作为高等师范专科学校物理专业《电子技术基础》课教材；也可作为电大、函大、职大、教育学院物理专业的教材；同时又可作为卫星电视教育培训初中教师教材及在职的中学教师和从事电子技术的工程技术人员或无线电爱好者的自学参考书。

责任编辑 郭玉凤

电子技术基础

王至正 朱汉荣 肖福坤 赵继德 合编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

文字六〇三厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 37.25 插页 1 字数 850 000

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数 1—6,600

ISBN 7-04-000839-4/TN·48

定价 6.40 元

符号说明

(一) 基本符号

(1) 电压和电流

I, i 电流通用符号

V, v 电压通用符号

V_{CC} 直流电源电压

V_i, v_i 输入电压有效值、瞬时值

V_o, v_o 输出电压有效值、瞬时值

V_m, I_m 正弦电压、正弦电流幅值

$\dot{V}=V(j\omega)$ 正弦电压复数值

$\dot{I}=I(j\omega)$ 正弦电流复数值

V_{IO}, I_{IO} 输入失调电压、输入失调电流

小写字母 v, i , 小写下标, 表示正弦交流瞬时值

(例如 i_c 表示集电极电流正弦交变分量瞬时值)

小写字母 v, i , 大写下标, 表示交、直流合成的总瞬

时值

(例如 i_c 表示集电极电流总的瞬时值)

大写字母 V, I , 大写下标, 表示无信号时的直流值

(例如 V_{BE} 表示无信号时 b-e 极间直流电压值)

大写字母 V, I , 小写下标, 表示交变分量的均方根值(例如 I_c 表示集电极电流交变分量的均方根值)

(2) 增益

A_i 电流增益

A_v 电压增益

A_{vm} 中频电压增益

G_p 功率增益

A_{vgm} 中频源电压增益

A_{vgl} 低频源电压增益

A_{vgh} 高频源电压增益

A 反馈放大器的开环增益

A_f 反馈放大器的闭环增益

(3) 频率

f_l, ω_l 放大器下限(下降 3 dB)频率、角频率

f_h, ω_h 放大器上限(下降 3 dB)频率、角频率

BW, Δf 通频带

(4) 阻抗

R, r 电阻通用符号

C 电容

L 电感

M 互感

Z 阻抗

Y 导纳

R_s 信号源内阻

R_L 负载电阻

R_i 输入电阻

R_o 输出电阻

C_i 输入电容

C_o 输出电容

(5) 功率

P 功率

p 瞬时功率

P_{CC} 电源供给的平均功率

P_i, P_o 输入、输出功率

P_{CM} 集电极最大允许耗散功率

P_{OM} 最大不失真输出功率

(二) 器件参数符号

(1) 晶体二极管

V_F 正向直流电压

V_{th} 阈电压(门限电压)

V_R 反向直流电压

$V_{(BR)}$ 击穿电压

V_{RM} 最高反向工作电压

I_F 正向直流电流

I_O 整流电流

I_R 反向直流电流

$I_{R(sat)}$ 反向饱和电流

I_{OM} 最大整流电流

C_j 结电容

C_D 扩散电容

C_T 势垒电容(耗尽层电容)

r_i 等效结电阻

r_s 串联电阻

(2) 稳压管

V_Z 稳定电压

I_Z 稳定电流

(3) 晶体三极管

V_{CE} 集电极-发射极(直流)电压

V_{BE} 基极-发射极(直流)电压

V_{CBO} 发射极开路时集电极-基极(直流)电压

V_{EBO} 集电极开路时发射极-基极(直流)电压

V_{CEO} 基极开路时集电极-发射极(直流)电压

$V_{(BR)CBO}$ 发射极开路时集电极-基极反向击穿电压

$V_{(BR)CEO}$ 基极开路时集电极-发射极反向击穿电压

$V_{CE(sat)}$ 集电极-发射极饱和压降

$V_{BE(sat)}$ 基极-发射极饱和压降

I_{CBO} 发射极开路时集电极-基极反向截止电流

I_{CEO} 基极开路时集电极-发射极反向截止电流

I_{CES} 基极-发射极间短路时, 集电极-发射极反向截止电流

I_{CBO} 发射极开路时集电极-基极反向截止电流

I_{CEO} 基极开路时集电极-发射极反向截止电流

I_{CES} 基极-发射极间短路时集电极-发射极反向截止电流

I_{CM} 集电极最大允许电流

$f_{\alpha fo}$ 共发射极截止频率

$f_{\alpha fb}$ 共基极截止频率

f_T 特征频率

h_{FE} 共发射极静态电流放大系数

h_{ie} 共发射极小信号短路(输出交流短路)输入阻抗

h_{re} 共发射极小信号开路(输入交流开路)电压反馈系数

h_{fe} 共发射极小信号短路(输出交流短路)电流放大系数

h_{oe} 共发射极小信号开路(输入交流开路)输

出导纳

r'_{bb} 基区体电阻

r_o 发射结正向电阻

r'_e 发射区体电阻

(3) 场效应管

JFET 结型场效应管

MOSFET 金属-氧化物-半导体场效应管(MOS

管)

V_{DS} 漏源电压

V_{GS} 栅源电压

$V_{GS(off)}$ 栅源截止电压(夹断电压)

$V_{GS(th)}$ 栅源阈值电压(开启电压)

$V_{(BR)DS}$ 漏源击穿电压

$V_{(BR)GS}$ 栅源击穿电压

$I_{DS(sat)}$ 饱和漏源电流

g_m 跨导(共源小信号低频)

r_{ds} 漏极动态电阻(小信号)

C_{gs} 栅-源电容(小信号)

C_{gd} 栅-漏电容(小信号)

C_{ds} 漏-源电容(小信号)

(三) 其他符号

A_o 共模放大倍数

A_d 差模放大倍数

AGC 自动增益控制

AVC 自动音量控制

AFC 自动频率控制

K_{CMR} 共模抑制比

CP 时钟脉冲

D 脉冲空度

K 频率覆盖系数、扫描速度、耦合系数

m 调幅系数

m_f 调频系数

N 脉冲数

$Q, \bar{Q}$ 双稳态触发器输出端

Tr 变压器

t_r 脉冲前沿时间

t_f 脉冲后沿时间

t_w 脉冲宽度

Y 逻辑门输出端、逻辑函数

η 效率

ξ 调谐回路失谐量

前 言

本书是在我院(原烟台师专)物理系一九八二年编写的内部交流《电子线路基础》教材基础上,根据主审单位提出的修改意见,以及征求了曾经使用过原教材兄弟学校的意见,并按照原教育部一九八二年九月在镇江召开的师专物理专业教学大纲审订会通过的《电子技术基础教学大纲》的要求,进行改编而成。

在改编过程中,我们针对师专的培养目标以及本课程的特点,注意精选内容,力求把内容的重点放在对基本概念的阐述和对基本电路的分析上,对重点内容照顾深度,一般内容照顾广度,力求理论联系实际,加强了实际内容。为了适应电子技术发展的需要,相应地加强了线性集成电路和数字集成电路部分。另外,从教学需要出发,每章都附有适量的习题和思考题。实验部分除紧密配合教材内容加深对基本电路的原理理解外,还特别重视培养学生对电子仪器的正确使用方法和实际操作能力。

参加本书编写工作的有王至正同志(第一、二章);朱汉荣同志(第五、六、七章,第八章§1~§7);肖福坤同志(第三、四章,第八章§8~§15);赵继德同志(实验部分)。王至正同志负责组织本书的编写工作并统稿。

本书由东北师范大学物理系郝会新教授、袁永昇、张振远副教授和李庆禹同志主审,他们对原书中的错误和不妥之处,提出许多宝贵的改进意见。本书在编写和改编过程中,曾经得到山东省各兄弟师专电子技术基础课任课老师的帮助和支持,他们提出了不少改进意见。山东师范大学物理系袁祖华副教授曾审阅了本书许多章节的原稿,提出了许多改进意见。我系尹续铎同志为本书绘制了大部分插图。他们对本书的出版和提高质量有很大的帮助。在此,对审阅本书及提出宝贵意见的同志,一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中谬误和不妥之处在所难免,恳切希望兄弟学校的师生和广大读者批评指正。

编 者

1986.12

目 录

第一章 晶体管原理1	§ 2.4 工作点的稳定与偏置电路53
§ 1.1 半导体的导电特性.....1	一、温度对放大器工作点的影响53
一、半导体的特点.....1	二、电压负反馈偏置电路55
二、本征半导体.....2	三、分压式电流负反馈偏置电路56
三、N型半导体和P型半导体.....3	四、综合偏置电路59
§ 1.2 PN结的形成及其特性.....4	五、补偿式偏置电路59
一、PN结的形成5	§ 2.5 多级放大器60
二、PN结的单向导电特性5	一、放大器的输入电阻与输出电阻61
§ 1.3 晶体二极管.....7	二、阻容耦合放大器的级间连接 和放大倍数63
一、晶体二极管的结构.....7	三、阻容耦合放大器的频率特性65
二、二极管的伏安特性.....8	* § 2.6 场效应管及场效应管 放大器74
三、二极管的参数10	一、结型场效应管工作原理和特性74
四、二极管的极间电容和变容二极管12	二、绝缘栅场效应管的工作原理和特性77
五、二极管的交流小信号等效电路12	三、场效应管的主要参数81
§ 1.4 晶体三极管.....13	四、场效应管放大器83
一、晶体三极管的放大作用原理13	§ 2.7 负反馈放大器87
二、晶体三极管共发射极连接的 静态特性曲线18	一、反馈放大器的基本概念87
三、晶体三极管主要特性参数22	二、反馈放大器的基本类型89
习题和思考题27	三、负反馈对放大器性能的改善94
第二章 晶体管低频放大器30	四、负反馈能改变放大器的输入、输出 电阻97
§ 2.1 单管放大电路.....30	五、负反馈放大器的分析100
一、电路组成30	六、射极输出器.....104
二、静态工作点32	§ 2.8 低频功率放大器107
§ 2.2 放大器的图解分析法.....34	一、功率放大器的特点及分类.....107
一、用图解法确定直流负载线与静态 工作点35	二、甲类单管功率放大器.....109
二、交流负载线与放大器的动态分析36	三、乙类推挽功率放大器.....113
三、静态工作点的正确选择40	四、互补对称推挽功率放大器.....117
§ 2.3 放大器的等效电路分析法.....43	五、晶体管扩音机.....122
一、晶体管的 h 参数44	习题和思考题.....124
二、晶体管 h 参数的等效电路46	第三章 常用放大器133
三、晶体管输入电阻的估算48	§ 3.1 直流放大器.....133
四、放大器的交流等效电路和放大倍数49	

一、直流放大器的特点	133	第五章 正弦振荡器	246
二、差分放大电路的基本形式	138	§ 5.1 LC 振荡器	246
三、射极耦合差分放大电路	140	一、LC 回路中的自由振荡	246
四、具有恒流源的差分放大电路	152	二、LC 振荡器的工作原理	249
§ 3.2 集成运算放大器	153	三、LC 振荡器的电路	250
一、运算放大器的特点	154	四、石英晶体振荡器	256
二、集成运放的基本组成	156	§ 5.2 RC 振荡器	260
三、集成运放电路举例及性能参数	163	一、RC 桥式振荡器	260
四、运算放大器的基本形式	167	二、RC 移相式振荡器	265
五、运算放大器的应用	171	习题和思考题	267
*六、运算放大器使用方法	179	第六章 无线电通信与收音机	270
§ 3.3 调谐放大器	181	§ 6.1 无线电通信的基本原理	270
一、调谐放大器的特点	181	一、无线电广播的基本原理	270
二、LC 谐振回路	183	二、电磁波的发射	270
三、单调谐放大器	198	三、无线电波段的划分	271
四、双调谐放大器	202	四、无线电波的传播	272
五、调谐放大器的稳定	205	§ 6.2 调制方式	273
习题和思考题	207	§ 6.3 调幅	273
第四章 直流稳压电源	213	一、调幅原理	273
§ 4.1 整流电路	213	二、调幅波的性质	276
一、半波整流电路	213	三、调幅电路	278
二、全波整流电路	214	§ 6.4 检波	280
三、桥式整流电路	215	一、小信号平方律检波	281
四、倍压整流电路	216	二、大信号直线性检波(包络检波)	282
§ 4.2 滤波电路	217	§ 6.5 调频与鉴频	284
一、电容滤波电路	218	一、调频	284
二、电感滤波电路	221	二、鉴频	286
三、复式滤波电路	222	§ 6.6 晶体管收音机	292
四、有源滤波电路	223	一、概述	292
§ 4.3 稳压管稳压电路	224	二、变频与变频电路	293
一、稳压二极管	225	三、超外差式收音机	297
二、稳压管稳压电路的工作原理	226	四、超外差式收音机的干扰	311
三、稳压电路的性能指标	227	*五、集成电路收音机	312
四、稳压电路的元件选择	228	习题和思考题	317
§ 4.4 串联型稳压电路	230	第七章 脉冲与数字电路基础	318
一、串联型稳压电路的基本原理	230	§ 7.1 脉冲的基本知识	318
二、带有直流放大的稳压电路	231	一、脉冲波形和参数	318
三、提高稳压电路性能的措施	234	二、脉冲电路的特点	319
四、集成稳压电路	238	§ 7.2 晶体管的开关特性	320
*五、串联型稳压电路设计计算举例	239	一、二极管的开关特性	320
习题和思考题	243		

二、三极管的开关特性.....	321	四、逻辑表达式的化简方法.....	369
§ 7.3 脉冲波形的变换.....	322	§ 7.12 集成触发器.....	370
一、RC 电路的过渡过程.....	322	一、基本 RS 触发器.....	370
二、微分电路.....	326	二、时钟 RS 触发器.....	372
三、积分电路.....	327	三、JK 触发器.....	374
四、限幅电路.....	328	四、D 触发器.....	375
五、钳位电路.....	330	§ 7.13 基本数字部件.....	377
§ 7.4 双稳态触发器.....	332	一、加法器.....	377
一、对称式集-基耦合双稳态触发器电路.....	332	二、寄存器.....	379
二、双稳态触发器的工作原理.....	332	三、计数器.....	380
三、触发方式.....	335	四、译码器和显示器.....	383
四、实际电路举例.....	338	§ 7.14 数字电路应用举例.....	387
§ 7.5 单稳态触发器.....	339	习题和思考题.....	389
一、射极耦合单稳态电路.....	339	第八章 电视	393
二、工作原理.....	339	§ 8.1 电视的发送.....	393
三、单稳态触发器的应用.....	341	一、图象与象素.....	393
四、实际电路举例.....	342	二、电视摄像管.....	394
§ 7.6 多谐振荡器.....	342	三、全电视信号.....	396
一、集-基耦合多谐振荡器的基本电路.....	342	四、电视信号的频带宽度.....	399
二、工作原理.....	343	五、隔行扫描.....	400
三、输出脉冲周期和幅度.....	344	六、电视信号的发送.....	401
四、多谐振荡器的改进电路.....	344	七、电视频道.....	402
五、实际电路举例.....	345	§ 8.2 电视接收机的组成.....	404
§ 7.7 间歇振荡器.....	345	一、信号通道部分.....	404
一、基本电路.....	345	二、同步扫描部分.....	405
二、电路工作原理.....	345	三、电源部分.....	405
§ 7.8 锯齿波发生器.....	347	§ 8.3 高频头.....	405
一、锯齿电压波的基本概念.....	347	一、高频头的组成.....	405
二、简单的锯齿波电压发生器.....	347	二、输入电路.....	406
§ 7.9 计数制.....	349	三、高频放大器.....	411
一、十进制和二进制.....	349	四、本机振荡器.....	412
二、十六进制.....	353	五、混频器.....	413
三、二十进制编码.....	355	六、实际的高频头电路举例.....	415
§ 7.10 逻辑门电路.....	356	§ 8.4 中频放大器.....	417
一、“与”、“或”、“非”基本逻辑关系.....	356	一、中频放大器的作用和要求.....	417
二、分立元件门电路.....	357	二、中频放大器的频率特性.....	417
三、集成逻辑门.....	361	三、中放电路的组合.....	419
§ 7.11 数字电路的分析方法.....	364	四、吸收回路.....	420
一、逻辑代数的基本概念.....	364	五、实际的中放电路举例.....	424
二、逻辑代数的基本定律.....	365	§ 8.5 视频检波器和视频放大器.....	425
三、逻辑函数及其表示方法.....	366	一、视频检波器.....	425

二、视频放大器	427
§ 8.6 显象管	433
一、显象管的构造	434
二、图象的显示	436
三、偏转线圈	436
四、中心位置调整	437
五、国产黑白电视显象管参数	438
六、显象管的有关电路	439
§ 8.7 自动增益控制电路	441
一、AGC电路的工作原理	441
二、AGC的类型	442
三、实际的AGC电路举例	447
§ 8.8 伴音电路	448
一、伴音中频放大器和限幅器	449
二、鉴频器	451
三、实际伴音电路举例	452
§ 8.9 同步分离电路	454
一、幅度分离电路	455
二、宽度分离电路	457
三、抗干扰电路	459
四、实际同步分离电路举例	461
§ 8.10 场扫描电路	462
一、场振荡电路	462
二、场输出电路	464
三、场激励电路	468
四、场扫描电路的畸变和补偿	469
五、实际场扫描电路举例	474
§ 8.11 行扫描电路	476
一、行输出电路	477
二、行激励电路	482
三、行振荡电路	483
四、自动频率控制电路	485
五、实际行扫描电路举例	487
§ 8.12 电源电路	489
§ 8.13 电视机整机电路分析	490
一、高频调谐器	490
二、中频放大器	490
三、视频检波及视频放大器	491
四、AGC电路	491
五、同步分离电路	491

六、伴音电路	491
七、行扫描电路	492
八、场输出电路	492
九、稳压电源	492
§ 8.14 电视机接收天线与馈线	492
一、电视信号的传播特点	493
二、天线的种类	493
三、馈线	497
* § 8.15 彩色电视介绍	498
一、色度学基础	498
二、彩色的摄象和显象	503
三、彩色电视信号的传送	509
四、彩色电视接收机的基本组成	511
习题和思考题	513
实验一、常用电子仪器的使用	515
实验二、晶体管特性与参数的测试	522
实验三、单级阻容耦合放大器的安装 与调试	527
实验四、负反馈放大器的性能测试	531
实验五、“OTL”功率放大器的调试	534
实验六、直流稳压电源的安装与调试	537
实验七、调谐放大器的调整与测试	540
实验八、RC振荡器的调试	543
实验九、小功率发射机的安装与调试	547
实验十、晶体管超外差式收音机的 安装与调整	550
实验十一、集-基耦合双稳态电路的 调试	554
实验十二、多谐振荡器及脉冲 波形变换	558
实验十三、TTL“与非”门电路	560
实验十四、运算放大器参数的测试	564
实验十五、集成运算放大器的应用	569
实验十六、晶体管黑白电视机的调整 与测试	571
实验十七、喇叭的配接及音响设备的 使用	579

第一章 晶体管原理

电子技术基础课程主要讲授晶体管电路,所以,晶体管是个关键的元件。学习电路首先必须对晶体管的工作原理和性能要有一个基本的了解,在这个基础上,才能对各种电路的工作原理有深刻的理解,才能正确和合理使用晶体管。本章从运用晶体管的角度出发,对晶体管的工作原理和性能作一介绍。

晶体管是由半导体材料做成的。为了便于了解晶体管的工作原理和性能,下面首先介绍一点有关半导体导电特性方面的基本知识。

§1.1 半导体的导电特性

一、半导体的特点

铜、银、铝等金属材料是很容易导电的,称为导体;陶瓷、塑料、橡胶、玻璃等却很不容易导电,这类材料称为绝缘体。导体的导电性能良好,电阻率很低,在 $10^{-8} \sim 10^{-6} \Omega \cdot m$ 之间。例如铜的电阻率为 $1.57 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。绝缘体的导电能力很差,电阻率很高,在 $10^8 \sim 10^{18} \Omega \cdot m$ 之间。例如橡胶的电阻率为 $10^{18} \Omega \cdot m$ 。

自然界除了导体和绝缘体外,还存在一类物质,其导电特性介于导体和绝缘体之间,它既不象导体那样容易导电,也不象绝缘体那样很难导电,这类物质称为半导体。半导体的电阻率介于导体和绝缘体之间,比较典型的数值为 $10^{-5} \sim 10^7 \Omega \cdot m$ 。例如纯锗在室温时电阻率为 $0.47 \Omega \cdot m$ 。

半导体之所以引起人们的注意,得到广泛的应用,其主要原因不是由于电阻率在数值上与导体和绝缘体有差别,而在于它的电阻率在各种因素(温度、光照、掺杂等)作用下将出现非常大的差别。第一、半导体的电阻率随着温度的上升而明显下降(负温度系数);而金属的电阻率是随温度升高而增加。例如铜,温度每升高 $1^\circ C$,电阻率增加 0.4% ;而半导体材料纯锗,当温度从 $20^\circ C$ 上升到 $32^\circ C$ 时,它的电阻率将减小一半左右。利用半导体的这种特性,我们很容易制成热敏电阻或其它对温度敏感的传感器。第二、半导体区别于导体和绝缘体的另一特点,是它的电阻率因光照的不同而改变。光照愈强,电阻率愈低。例如硫化镉薄膜电阻,无光照时电阻为几十兆欧姆,当光照射后电阻只有几十千欧姆。利用半导体的这一性质,可以做成各种光敏元件,如光敏电阻、光导管等。第三、半导体的电阻率受杂质影响很大,这一点与导体及绝缘体截然不同。在金属导体中,如果掺入少量杂质,其电阻率虽增加但变化不大;半导体却不同,在纯净的半导体中即使掺入极微量的杂质,就能使其电阻率大大降低。例如,在纯硅中加入百万分之一的硼,它的电阻率就从约 $2 \times 10^3 \Omega \cdot m$ 降到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 左右。不仅如此,选择不同类型的杂质,还可改变

半导体的导电类型。我们利用了半导体的这一特点,通过各种工艺手段,控制半导体中杂质的数量和性质,从而制成了各种不同性能的半导体器件。

半导体为什么具有以上特点,这就需要从它的内部导电机构说明。先从最简单的本征半导体讨论起。

二、本征半导体

目前做晶体管最常用的有锗(Ge)、硅(Si)等半导体材料。制造晶体管需要把半导体材料提炼成单晶体。单晶体内原子整齐地按一定规律排列着,原子之间的距离都是相等的,约为 2.35×10^{-4} 微米,通常把这种非常纯净的且原子排列整齐的半导体称为本征半导体。下面我们从原子结构的规律出发,来分析半导体硅和锗的导电特征。

一个硅原子,由带正电的原子核和围绕它的 14 个带负电的电子组成,这些电子按一定规律分布在三层电子轨道上,如图 1-1(a)所示,图 1-1(b)为锗原子结构。由于原子核带 14 个电子电量的正电,故正常情况下原子呈中性。靠近原子核的两个内层轨道上有 10 个电子,它们受原子核束缚力较大,很少有离开运动轨道的可能,所以它和原子核组成一个惯性核,它的净电量为 $14 - 10 = 4$ 个电子电量,如图 1-2 所示。而最外层轨道上的四个电子受原子核束缚力较小,叫做价电子。硅和锗原子都有四个价电子,故叫四价元素。元素的物理性质和化学性质主要由价电子的数量所决定。

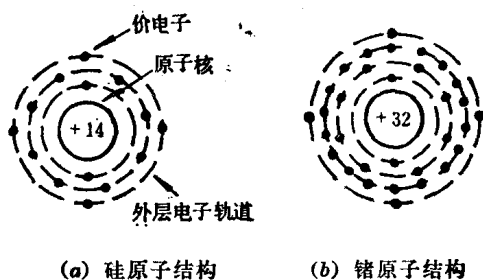


图 1-1 硅和锗的原子结构

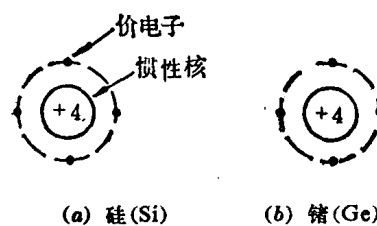


图 1-2 原子结构简化图

在硅、锗制成单晶后,每个原子最外层四个价电子,不仅受自身原子核的束缚,而且还受周围四个相邻原子核的吸引,两个相邻原子共有一对价电子。这个电子对中的任何一个价电子,一方

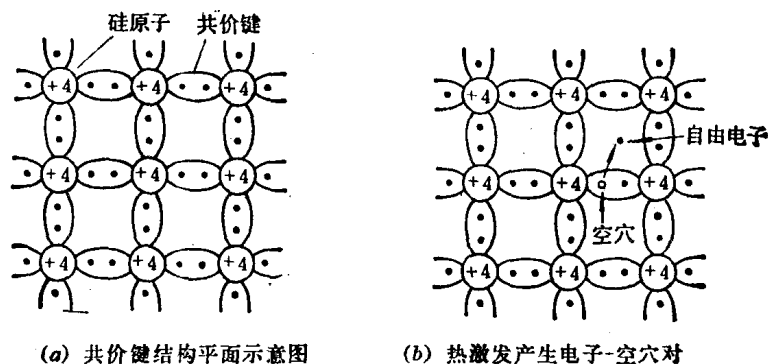


图 1-3 硅晶体的结构与电子-空穴对的产生

面围绕自身的原子核运动,另一方面也会出现在相邻的原子的外层轨道上,价电子这种组合方式称为共价键结构。图 1-3(a)便是这种共价键结构平面示意图。

由原子理论可知,当原子的最外层电子数为八个时,其结构就成为比较稳定的状态,外层电子受到较大束缚力不能参与导电。但是硅、锗单晶体是靠共价键结构才保证每个原子最外层的电子数达到八个的,所以它的价电子所受到的束缚力并不像绝缘体那样大,在室温下由于热运动,其中少数电子可能获得较大能量,挣脱束缚而成为自由电子。价电子在受激摆脱束缚成为自由电子后,同时在原来共价键的位置上留下一个缺少负电荷的空位,这个空位叫做空穴,如图 1-3(b)所示。显然,空穴带正电,具有空穴的硅原子成为正离子,正离子的电荷量可以看成是空穴所带的正电量。空穴也是可以运动的,但它与自由电子的运动方式不同,当附近某一位置有个电子跳过来填充原来的空穴位置之后,则某位置处就出现了一个新的空穴,也即相当于空穴移动到附近的某一位置上去了,这样依次填补下去,便形成空穴的移动。通常我们不说共有电子依次填补空位的移动,而直接说空穴的移动。

在本征半导体中,自由电子的数量和空穴的数量是相等的。在外电场作用下,电子和空穴以相反的方向作有规则的运动而形成电流。所以在半导体中传导电流的不仅是电子,还有带正电的空穴,电子和空穴统称载流子,这是本征半导体导电的一个重要特性。

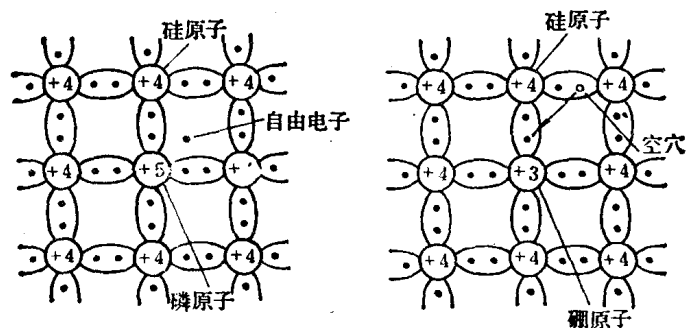
在本征半导体中,受激产生一个自由电子,必然相伴产生一个空穴,电子和空穴是成对产生的,这种现象称为本征激发。另一方面,自由电子在运动过程中,可能会与空穴重新结合而成为消失,这种与激发相反的过程叫复合。在一定环境温度下,激发与复合的过程虽然在继续不断地进行,但电子-空穴对的数目保持不变,这种状况称为动态平衡。但是,当温度升高后,平衡就要被破坏,开始时,激发数将超过复合数,半导体内电子-空穴对的总数逐渐增加,但是复合也跟着增加,当复合数上升到与激发数相等时,一个新的平衡又建立起来,这时电子-空穴对总数在一个新的水平上保持不变。显然,半导体内电子-空穴对总数在温度高时比温度低时要大。半导体导电能力与温度有密切的关系,其原因就在这里。

三、N 型半导体和 P 型半导体

本征半导体的导电能力很差,因而,实际上用处不大。但如果在本征半导体中有选择地掺入微量的某种杂质元素,情况就不同了。杂质可以改变半导体中载流子的浓度,从而达到人为控制半导体电阻率的目的。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。杂质半导体分为 N 型(电子型)半导体和 P 型(空穴型)半导体。

1. N 型半导体

在硅单晶中掺入少量五价元素如磷(或者砷、锑等),如图 1-4(a)所示。因为磷原子的最外层电子轨道上有五个价电子,其中四个和周围的硅原子构成共价键,尚有一个电子多余。这个多余的电子受原子核的束缚十分微弱。在室温下,这个电子受热激发所获得的能量足以摆脱磷原子核对它的束缚,成为一个自由电子。几乎每一个磷原子都能提供一个自由电子,故磷(或砷、锑等)称为施主杂质。磷原子失去了一个电子,本身便成为一个带正电的离子。它固定在晶格中,不能移动,共价键中的电子也不可能来填补它,所以没有空穴产生。在掺有施主杂质的半导体



(a) 硅中掺磷形成N型半导体 (b) 硅中掺硼形成P型半导体

图 1-4 硅单晶掺杂示意图

中, 导电电子的数量远远多于空穴的数量, 称为电子型半导体, 或 N 型半导体。

在 N 型半导体中, 电子是传递电流的主要带电粒子称为多数载流子; 空穴称为少数载流子, 是由热激发产生的。但是由于电子的增多, 空穴遇到电子而被复合的几率增大, 所以空穴的浓度远小于相同温度下本征半导体中的空穴浓度。

2. P 型半导体

如果在硅单晶体中, 掺入少量的三价元素硼, 如图 1-4(b) 所示。由于硼的价电子只有三个, 当它和周围的硅原子形成共价键时, 缺少一个电子, 由于不是稳定结构, 硼原子很容易从邻近的共价键中夺取一个电子, 变成一个带负电的离子。而在失去电子的共价键中形成一个空穴。硼称为受主杂质, 在这种掺有受主杂质的半导体中, 空穴是多数载流子, 自由电子是少数载流子。这种半导体称为空穴型半导体或 P 型半导体。

在杂质半导体中参加传递电流的载流子主要是多数载流子, 由于杂质原子在室温下全部电离, 所以多数载流子的浓度与温度无关, 而少数载流子数量极少, 并随温度上升而增多。

在实际的半导体材料中, 尽管纯度很高, 但也难免有杂质存在, 而且因为经常需要同时掺有施主杂质和受主杂质, 这时施主杂质和受主杂质对半导体导电性能的影响, 有互相抵消的趋势, 这种作用称为杂质补偿。如果受主杂质占优势, 就整体而言, 半导体仍为 P 型。如果施主杂质占优势, 就整体而言仍为 N 型。

最后还需指出, N 型和 P 型半导体都属电中性, 对外不显电性。这是由于单晶半导体和掺入的杂质都是电中性的, 而且在掺杂过程中既不丧失电荷也不从外界得到电荷, 只是由于杂质原子的价电子数目比晶体原子的价电子数目多一个或少一个, 而使半导体中出现了大量可以运动的电子或空穴, 并没有破坏整个半导体内正负电荷的平衡状态。

§1.2 PN 结的形成及其特性

如果在一块本征半导体的两边, 掺以不同的杂质, 使一边成为 N 型半导体, 另一边变为 P 型半导体, 则在两种不同类型半导体的交界面处就会形成一个特殊导电薄层, 称为 PN 结。PN 结是构成二极管、三极管、固体组件、可控硅等各种类型半导体器件的基础。

一、PN 结的形成

现结合图 1-5 来说明 PN 结的形成。P 型半导体和 N 型半导体未“接触”前,在 P 型半导体中,有大量的空穴和很少的电子,而 N 型半导体中则相反,多数载流子是电子,少数载流子是空穴。P 区中的空穴密度大于 N 区,而 N 区中电子密度大于 P 区,如图 1-5(a)所示。当 P 型半导体和 N 型半导体“接触”以后,由于电子和空穴浓度差的存在,在它们交界的地方,便发生电子和空穴的扩散运动,如图 1-5(b) 所示。靠近 N 区界面的电子向 P 区扩散,并与 P 区空穴复合,而在 N 区界面处,剩下不能移动的施主正离子,构成一个正电荷层。同样,P 区的空穴向 N 区扩散,并与 N 区电子复合,在 P 区界面处显露出不能移动的受主负离子,形成一个负电荷区。结果在 PN 结边界附近形成一个空间电荷区,边界的左边(原 P 区)带负电,右边(原 N 区)带正电。因此在 PN 结中产生一个内电场 E_i ,内电场的方向由 N 区指向 P 区,如图 1-5(c)所示。内电场的存在对空穴和电子的扩散运动是起阻碍作用的,带正电的空穴继续向 N 区扩散要受到电场的阻力,带负电的电子继续向 P 区扩散也要受到电场的阻力。结中内电场的作用实际上是驱使结内及其附近的载流子向扩散的逆方向运动。我们把载流子在电场力作用下的运动称为漂移运动。所以,漂移运动与扩散运动是 PN 结中载流子运动的主要矛盾。

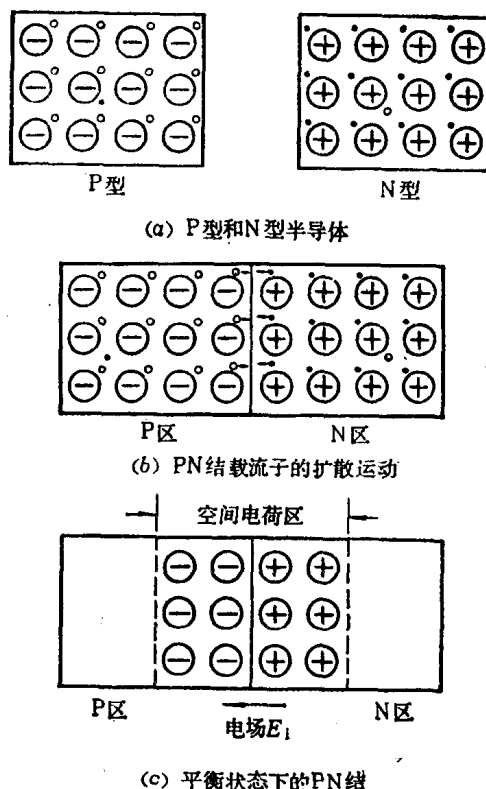


图 1-5 PN 结的形成

在扩散开始时,矛盾的一方扩散运动占优势。随着扩散的进行,PN 结的空间电荷区不断加宽,电场增强,电场引起的漂移运动也不断增强,当两者作用相等时,就达到了动态平衡。这时 PN 结中没有电流(从宏观看电流为零,并不意味着在任何时候都没有载流子流过 PN 结)。于是在交界面处形成稳定的空间电荷区,空间电荷区内缺少载流子,结内电阻率很高,因此 PN 结是个高阻区,因结内载流子很少,所以又常称为耗尽层。PN 结很薄,一般约为 0.5 微米左右。

二、PN 结的单向导电特性

在了解了 PN 结内部载流子运动规律后,就不难解释 PN 结在外部电源作用下所反映出来的一个重要的特性,即单向导电特性。

1. PN 结外加正向电压

如图 1-6(a)所示,给 PN 结加上正向电压,即外电源正极接 P 区,负极接 N 区。这时外加电压在耗尽层中所建立的外电场 E_F 与耗尽层中的内电场 E_i 方向相反。从而削弱了空间电荷所产生的内电场,使空间电荷区变窄,有利于多数载流子的扩散运动,于是 P 区的多数载流

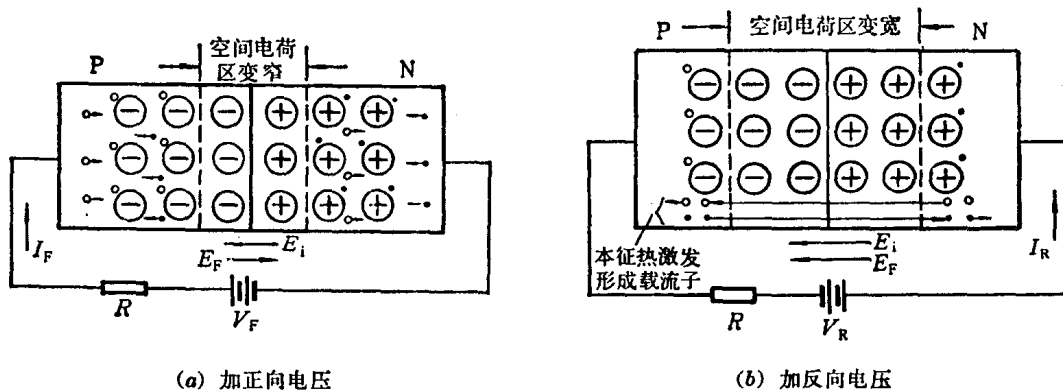


图 1-6 PN 结单向导电

子——空穴能顺利通过 PN 结耗尽层扩散到 N 区, N 区的多数载流子——电子能顺利通过 PN 结耗尽层扩散到 P 区。扩散结果会在 P 区一侧积累大量的电子, N 区一侧积累大量的空穴。这些积累的电子和空穴是不能久留的, P 区一侧积累的电子向 P 区体内扩散, 并和 P 区中多数载流子空穴复合而消失; 而 N 区一侧积累的空穴将向 N 区体内扩散, 并和 N 区中多数载流子电子复合而消失。为了保持 P 区和 N 区体内的电中性, P 区和 N 区中因复合而损失的多数载流子必须由电源来补充, 这就是在外加正向电压作用下, 空穴扩散电流和电子扩散电流流通的过程。

由于电子和空穴是带异号电荷的, 所以实际上空穴扩散电流 I_{FP} 和电子扩散电流 I_{FN} 的方向相同, 都是由 P 区指向 N 区, 总扩散电流 I_F 等于空穴扩散电流与电子扩散电流之和, 即

$$I_F = I_{FP} + I_{FN}$$

当外加电压升高时, 耗尽层中内电场被进一步削弱, 扩散作用更占优势, 因而正向电流随正向电压升高而迅速增大。

由于多数载流子的浓度较大, 当外加电压不太高时, 就可以形成很大的扩散电流, 所以 PN 结的正向电阻较小。

2. PN 结外加反向电压

如果给 PN 结外加一个反向电压, 即外电源正极接 N 区, 负极接 P 区, 如图 1-6(b) 所示。这时, 外电场 E_F 与内电场 E_i 的方向一致, 加强了空间电荷区的电场强度。耗尽层的厚度比平衡时加宽, 使多数载流子的扩散运动更难进行。

应当注意到 P 区和 N 区都有少数载流子(即指 P 区中的电子和 N 区中的空穴), 空间电荷区的电场加强后却有利于少数载流子的漂移运动。P 区的少数载流子电子在电场作用下到达 N 区, 并继续向电源正极漂移, 而形成电子漂移电流 I_{RN} 。同样 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移形成空穴漂移电流 I_{RP} 。总漂移电流为

$$I_R = I_{RN} + I_{RP}$$

但由于少数载流子的浓度很小, 即使它们全部漂移, 其总漂移电流 I_R 还是很小的。故外加反向电压时, PN 结的反向电阻很大。

P 区的极少量电子和 N 区的极少量空穴,是本征激发(和温度有密切关系)产生的,所以 PN 结的反向电流随温度变化是很激烈的。下表就是硅管的反向电流随温度变化的情况。如果以室温 25°C 时硅管的反向电流为 1,则温度升高时,反向电流增大的倍数大致如表 1-1 所示。

表 1-1 环境温度对反向电流的影响

环境温度	25°C	35°C	95°C	140°C
反向电流	1	10	100	1000

所以制造和使用半导体器件时,必须考虑环境温度对半导体元件特性的影响这一重要因素。

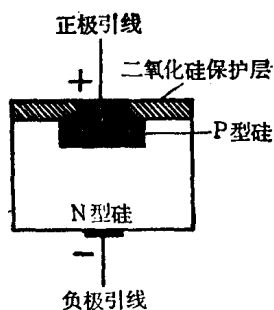
§1.3 晶体二极管

一、晶体二极管的结构

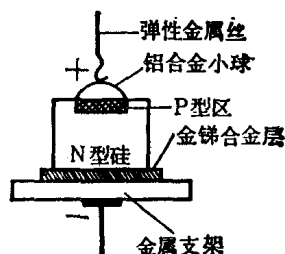
晶体二极管是由一个 PN 结加上欧姆接触电极、引出线和管壳构成的。二极管的符号见图 1-7(d) 所示,其中三角形表示 P 区,短线表示 N 区。

晶体二极管有许多类型。按材料分,最常用的有锗管和硅管两种;按结构工艺分,有点触型和面结型,其中面结型又可分为生长型、合金型、平面型等。常见的二极管有下面几种类型:

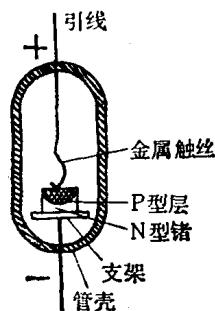
1. 平面型二极管



(a) 平面型二极管



(b) 面接触型二极管



(c) 点接触型二极管



(d) 符号

图 1-7 二极管的结构及符号

平面型二极管的管芯结构如图 1-7(a) 所示。它是在 N 型硅片上通过氧化、光刻、扩散等一套工艺而形成 PN 结的。再做出电极引线,并把管芯封置于管壳之中,即制成平面型二极管。

2. 面结型二极管

面结型二极管的管芯如图 1-7(b) 所示。制造时将小铝球置于 N 型硅片上加热,使铝球与硅片接触的部分熔化,互相渗透,冷却后重新结晶的固体硅,包含有大量的铝原子,相当于在硅中掺入大量的三价杂质,这一部分硅薄层就变成了 P 型,它与下面的 N 型硅形成一个 PN 结。

3. 点接触型二极管

点接触型二极管的管芯如图 1-7(c) 所示。用一根含有“杂质”元素的细金属丝压在硅或锗晶片上,通以瞬时的大电流,产生大量的热,使金属丝一部分杂质原子掺入到晶片中,从而形成一个导电类型与原来晶片相反的区域,构成 PN 结。由于金属丝很细,形成的 PN 结面积很小。

面结型二极管和部分平面型二极管,它们的特点是结的面积大,因而允许通过较大的电流,能承受较高的反向电压和较大的功率。但由于结的电容(见二极管参数)也大,因而它们只能用于大功率整流等低频电路中。点接触型和一些平面型二极管,由于结的面积很小,结电容也小,工作频率高,适用于高频电路和开关电路。

二、二极管的伏安特性

加到二极管两端的电压与流过二极管电流的关系曲线,叫做二极管的伏安特性曲线。伏安特性曲线可用实验的方法逐点测绘得出,也可用图示仪从荧光屏上直接观察。图 1-8 画出了硅二极管的伏安特性曲线,我们把它分成三个部分来讨论。

1. 正向特性

当二极管两端加正向电压时,就产生正向电流,但当正向电压较小时,外电场还不足以克服结内电场对载流子扩散运动造成的阻力,这时正向电流很小,二极管呈现较大的电阻(如图 1-8

OA 段),通常称这个区域为死区。当二极管两端电压超过一定数值 V_{th} 以后(V_{th} 叫做阈电压或门限电压,数值大小常随管子的材料和温度不同而不同,硅管 $V_{th} \approx 0.5V$,锗管 $V_{th} \approx 0.1V$),结内电场被大大削弱,二极管的电阻变得很小,正向电流随正向电压增长的很快(图中 B 点以上部分)。正向电流开始急剧增大时所对应的正向电压称为正向压降,以 V_F 表示,硅管 $V_F \approx 0.7V$,锗管 $V_F \approx 0.3V$ 。

2. 反向特性

外加反向电压时,其外电场与内电场方向一致,多数载流子的扩散运动被阻止,少数载流子在电场力作用下产生漂移运动而形成数量很小的反向电流。当反向电压很小时,反向电流 I_R 随反向电压 V_R 的增大而略有增加,此时为曲线 OC 段的情形。当 V_R 再增大时,几乎所有的少数

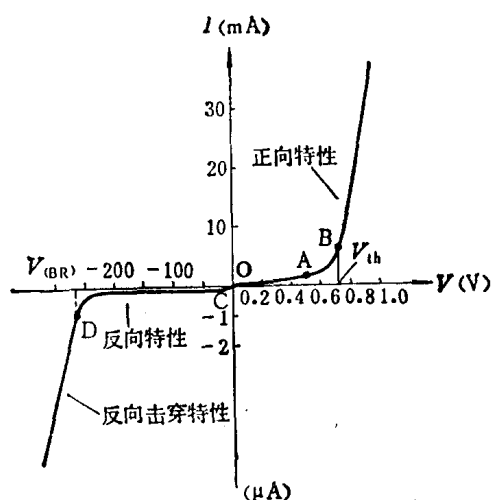


图 1-8 二极管的典型伏安特性