

高等学校试用教材

# 电子电路基础

南京大学物理系  
应用电子学教研室编

高等教育出版社

高等学校试用教材

**电子电路基础**

南京大学物理系应用电子学教研室编

•  
高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

二二〇七工厂印装

•  
开本 787×1092 1/16 印张 25.25 插页1 字数 570,000

1981年11月第1版 1983年2月第3次印刷

印数 26,601 39,000

书号 15010·0362 定价 2.15 元

## 前 言

本书是根据一九七七年十月全国高等院校理科物理教材会议拟订的《电子电路基础》大纲编写的，在修改过程中，又参照了一九八〇年六月高校理科物理编委会审定的《电子线路》教学大纲。鉴于《电子电路基础》是物理专业的一门技术基础课，本书只包括模拟电路与数字电路中的基本内容，重点放在阐明基本概念、基本原理与基本分析方法上。在阐述单元电路的基础上，分析一些常用的电子仪器电路，以培养学生分析整机电路的能力。

本书的总学时数约100，除去加星号部分约70学时。各校可根据本校的教学要求和学时数决定取舍。本书与南京大学物理系应用电子学教研室编写的《电子电路实验》一书配套，可作为综合性大学与师范院校物理类专业《电子电路基础》课的试用教材。

本书是在南京大学物理系应用电子学教研室多年来教学实践的基础上编写的。严志华同志任主编。第一、二、三(3.1、3.3、3.4、3.5)、六、七(7.1)、九、十(10.1、10.2、10.3、10.4)章和附录I、IV、V由尤显祖同志编写；第三(3.6)、四、五、七(7.2)、八、十二、十三章及附录II、III由庄廷妨同志编写；第三(3.2)、十(10.5)、十一章由严志华同志编写。在书稿整理过程中卢钦民同志参加了许多工作。陈金媛同志为本书绘制了插图。

本书由中山大学物理系主持审稿，北京师范大学、山东大学、河南师范大学、华东师范大学、宁夏大学、西南师范学院、山西大学、黑龙江大学、辽宁大学、陕西师范大学和华中师范学院的同志参加了审稿会，与会同志提出了很多宝贵的意见，我们在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中一定有错误和不妥之处，请试用本书的教师和广大读者提出宝贵意见。

编 者

# 目 录

## 第一章 晶体管.....1

1.1 半导体的导电特性.....1	1
1. 半导体的特点.....1	1
2. 本征半导体.....1	1
3. 杂质半导体.....3	3
1.2 PN 结.....5	5
1. PN 结的形成.....5	5
2. PN 结加正向电压.....6	6
3. PN 结加反向电压.....7	7
4. PN 结的伏安特性.....7	7
5. P+N 结与 PN+ 结.....8	8
1.3 PN 结的击穿.....9	9
1. 齐纳击穿.....9	9
2. 雪崩击穿.....9	9
1.4 PN 结的电容.....9	9
1. 势垒电容 $C_T$ .....10	10
2. 扩散电容 $C_D$ .....11	11
1.5 晶体二极管.....12	12
1. 伏安特性.....12	12
2. 等效电路.....13	13
3. 直流图解法.....15	15
4. 参数.....16	16
1.6 晶体三极管.....16	16
1. 三极管的结构.....16	16
2. 三极管内的物理过程.....18	18
3. 电流传输方程.....19	19
4. 三极管的三种基本组态.....21	21
1.7 三极管的 $T$ 型等效电路.....22	22
1. 基区体电阻 $r_{bb}$ .....22	22
2. 简化的 $T$ 型等效电路.....23	23
3. 基区调变效应.....24	24
1.8 三极管的特性曲线.....24	24
1. 输入特性曲线.....25	25
2. 输出特性曲线.....26	26
1.9 三极管的特性参数.....28	28
1. 直流参数.....28	28

2. 极限参数.....29	29
复习思考题和习题.....31	31

## 第二章 晶体管放大器的基本分析方法.....31

2.1 晶体管放大器基本原理.....34	34
1. 基本电路.....34	34
2. 各元件的作用.....34	34
3. 各种放大倍数的定义.....37	37
2.2 放大器的图解分析法.....38	38
1. 放大器直流工作状态的计算.....38	38
2. 放大器的静态图解.....40	40
3. 放大器的动态图解.....41	41
4. 设置静态工作点的必要性.....47	47
2.3 放大器的等效电路分析法.....48	48
1. 低频 $h$ 参数等效电路.....49	49
2. $h$ 参数的物理意义.....50	50
3. 从特性曲线上求 $h$ 参数.....51	51
4. 放大器放大倍数的计算.....52	52
5. 输入电阻的计算.....53	53
6. 受输入电压控制的等效电路.....54	54
7. $h$ 参数与工作点的关系.....54	54
2.4 放大器的输入电阻和输出电阻.....55	55
1. 输入电阻.....55	55
2. 输出电阻.....56	56
2.5 晶体管的混合 $\pi$ 型等效电路与高频参数.....58	58
1. 晶体管混合 $\pi$ 型等效电路.....58	58
2. 晶体管的高频参数.....59	59
2.6 静态工作点的稳定.....62	62
1. 影响静态工作点的因素.....62	62
2. 稳定工作点的偏置电路.....64	64
3. 偏置电路的补偿.....67	67
复习思考题和习题.....68	68

## 第三章 阻容耦合放大器.....73

3.1 频率特性.....73	73
1. 线性失真.....73	73

2. 不失真的传输条件	75
3. 通频带	76
4. 幅频特性曲线和相位特性曲线的近似画法	77
3.2 阻容耦合放大器	79
1. 典型电路	79
2. 中频区	79
3. 低频区	80
4. 高频区	86
5. 举例	92
3.3 电路元件对放大器频率响应的影响	93
1. 耦合电容 $C$ 和发射极旁路电容 $C_e$ 的影响	93
2. $C_L$ 的影响	93
3. 晶体管的特征频率 $f_T$ 的影响	94
4. $C'_e$ 和 $r_{bb'}$ 的影响	94
5. $R_e$ 的影响	94
6. $R_L$ 的影响	94
7. $R_b$ 的影响	94
8. $I_b$ , $h_{ie}$ 和 $\beta_o$ 的影响	95
3.4 放大器的非线性失真与动态范围	95
1. 非线性失真的根源	95
2. 非线性失真系数	97
3. 放大器的动态范围	98
3.5 多级放大器	99
1. 中频区	100
*2. 低频区	100
*3. 高频区	101
*4. 多级放大器的通频带	102
*3.6 放大器的噪声	102
1. 固有噪声的来源	103
2. 噪声带宽	105
3. 噪声系数	105
4. 晶体管的噪声系数	106
5. 降低噪声系数的技术措施	107
复习思考题和习题	107

#### 第四章 负反馈放大器 110

4.1 反馈的基本概念	110
1. 反馈	110
2. 反馈的分类	110
3. 反馈放大电路的组成	113
4. 反馈电路的输入、输出阻抗对基本放大器影响的考虑规则	114
5. 反馈系数	114
4.2 反馈放大器的放大倍数	115

1. 基本公式的推导	115
2. 正反馈和负反馈的判别	116
3. 举例	117
4.3 负反馈对放大器性能的影响	119
1. 提高放大倍数的稳定性	119
2. 展宽通频带	120
3. 减小非线性失真	122
4.4 反馈放大器的输入电阻和输出电阻	123
1. 具有线性从属电源的等效电阻	124
2. 反馈对放大器输入电阻的影响	125
3. 反馈对放大器输出电阻的影响	127
4.5 射极输出器	132
1. 射极输出器的放大倍数	132
2. 射极输出器的输入电阻	133
3. 射极输出器的输出电阻	133
*4. 具有自举电路的射极输出器	133
*5. 射极输出器的输入电容	135
4.6 多级多环反馈放大器的分析	136
*4.7 晶体管毫伏表	140
1. DA-16 型晶体管毫伏表的技术性能	140
2. 方框结构图	140
3. 电路分析	141
复习思考题和习题	143

#### 第五章 直流放大器 147

5.1 直流放大器的特点	147
1. 级间耦合方式	147
2. 零点漂移	149
5.2 差动式直流放大器	154
1. 差动式直流放大器的工作原理	154
2. 典型的差动式直流放大器电路分析	156
5.3 差动式直流放大器的改进	166
1. 具有恒流源的差动式直流放大器	166
2. 集成化差动式直流放大器	169
*5.4 单端输入单端输出差动式直流放大器	170
1. 静态工作点的计算	170
2. 放大倍数的计算	170
3. 共模抑制比	171
4. 零点漂移	171
5.5 运算放大器的工作原理和电路分析	172
1. 集成运算放大器 8FC1 工作原理	172
*2. 集成运算放大器 8FC1 静态工作点的计算	173
*3. 集成运算放大器 8FC1 各级放大倍数的计算	174
4. 集成运算放大器的主要参数	176

5.6 集成运算放大器的反馈特性	178
1. 反相输入反馈特性	178
2. 同相输入反馈特性	180
5.7 运算放大器的应用	181
1. 比例器	181
2. 加法器	182
3. 减法器	182
4. 积分器	183
5. 微分器	183
6. 对数放大器	183
7. 反对数放大器(指数放大器)	184
8. 乘法器	185
9. 除法器	185
复习思考题和习题	186

## 第六章 功率输出级

6.1 功率输出级的几个基本问题	189
1. 功率输出级的分类	189
2. 效率	189
3. 非线性失真	190
4. 最大功率输出	190
5. 匹配	190
6. 散热	190
6.2 甲类功率输出级	191
6.3 变压器耦合推挽功率输出级	193
6.4 无输出变压器电路	196
1. 互补对称电路	196
2. 复合管互补对称电路	196
复习思考题	197

## 第七章 选频放大器

7.1 LC 调谐放大器	198
1. 串、并联电路的等效变换	198
2. 最大功率传输条件	200
3. 晶体管的 $y$ 参数等效电路	200
4. 单调谐 LC 放大器	201
5. 高频放大器的中和	206
*7.2 RC 选频放大器	207
1. 双 T 选频网络传输特性	207
2. 双 T 网络选频放大器	213
复习思考题和习题	216

## 第八章 晶体管直流电源

8.1 整流电路	218
1. 整流电源的技术指标和极限参数	218
2. 半波整流电路	218
3. 全波整流电路	220
4. 桥式整流电路	222
*5. 倍压整流电路	222
8.2 电源滤波器	223
1. 电容滤波器	223
2. 电阻电容 $\pi$ 型滤波器	224
*3. 晶体管滤波器	225
8.3 硅稳压二极管和简单稳压电路	227
1. 硅稳压二极管	227
2. 简单稳压电路的稳压原理	228
3. 稳压器的稳定度和内阻	228
4. 简单稳压电路限流电阻的选择	229
8.4 串联型直流稳压器	230
1. 电路的组成和工作原理	230
2. 定量分析	232
8.5 稳压器的改进	234
1. 调整管采用复合管	234
2. 用恒流源作为比较放大器的负载	235
3. 比较放大器采用稳定的辅助电源	236
4. 比较放大器采用差动式放大电路	236
*8.6 稳压电源的过载保护	238
1. 限流型保护电路	237
2. 截止型保护电路	237
*8.7 稳压电源实例分析	237
1. 主要技术指标	237
2. 主电源	238
3. 上辅助电源	240
4. 下辅助电源	240
5. 过载保护电路	240
复习思考题和习题	240

## \*第九章 频率变换

9.1 调幅	243
1. 调幅波的基本性质	243
2. 调幅方法简介	244
9.2 检波	246
9.3 调频与鉴频	247
1. 调频	247
2. 鉴频器	250

9.4 混频	252
9.5 倍频器	254
复习思考题和习题	255

**第十章 振荡器** ..... 256

10.1 振荡器的基本原理	256
1. 一个典型振荡器的工作过程	256
2. 起振条件	257
3. 平衡条件	257
4. 振荡器的稳定条件	258
10.2 几种常用的 LC 振荡电路	260
1. 发射极调谐振荡电路	260
2. 三点式振荡电路	261
*10.3 振荡器的频率稳定	262
1. 元件参数变化引起振荡频率的变化	262
2. 晶体振荡器	263
10.4 RC 振荡器	264
1. RC 电路的选频作用	264
2. 文氏桥振荡器	265
*10.5 低频信号发生器实例分析	268
1. 信号发生器的方框结构	268
2. 低频信号发生器的电路分析举例	269
3. RC 振荡器性能分析	270
复习思考题	274

**第十一章 脉冲与数字电路** ..... 276

11.1 概述	276
1. 脉冲与数字电路在测试中的应用	276
2. 脉冲波简介	276
3. 脉冲电路的特点	276
4. 脉冲的基本参数	277
11.2 RC 电路的瞬态过程	278
1. 用 RC 电路形成尖顶脉冲	278
2. RC 耦合电路对脉冲顶部的影响	280
3. 用 RC 电路形成线性变化电压	280
4. 分布电容对上升沿的影响	281
5. 分布电容对分压电路的影响	282
6. 单时间常数 RC 电路的普遍表达式	284
11.3 晶体管开关特性	285
1. 二极管的开关特性	285
2. 三极管的开关特性	286
3. 三极管开关电路驱动方式的改进	292
11.4 限幅(削波)器	291
1. 二极管限幅器	294

2. 三极管限幅器	296
11.5 门电路	297
1. 与门	297
2. 或门	299
3. 非门	300
4. 与非门和或非门	300
11.6 集基耦合双稳态触发器	300
1. 集基耦合双稳态触发器的两个稳定状态	301
2. 正常工作条件	302
3. 集基耦合双稳态触发器的触发翻转条件	303
4. 触发方式	305
*11.7 射极耦合双稳态触发器	308
1. 工作原理和滞后电压	308
2. 电路特性和滞后电压形成原因	310
3. 射极耦合触发器的应用	311
*11.8 集基耦合单稳态触发器	312
1. 集基耦合单稳态触发器的工作原理	312
2. 单稳态触发器的应用	315
*11.9 多谐振荡器	316
11.10 锯齿波发生器	317
11.11 同步	320
11.12 数字集成电路简介	321
1. DTL 和 TTL 与非门	322
2. 集成双稳态触发器	323
11.13 数字电路的应用	327
1. 二进制计数器	327
2. 十进制计数器	328
3. 译码器	329
4. 移位寄存器	331
*11.14 数字式频率计	332
1. E312 型数字式频率计的主要技术指标	332
2. E312 型数字式频率计的方框图和工作原理分析	332
3. 误差分析	341
习题	341

**第十二章 场效应管放大器** ..... 345

12.1 场效应管的基本原理	345
1. 结型场效应管的结构和特性	345
2. 绝缘栅场效应晶体管的结构和特性	348
3. 场效应管的主要参数	353
12.2 场效应管放大器	354
1. 直流偏置电路与静态工作点的计算	354

2. 场效应管放大器的分析方法.....	358	2. X轴.....	367
3. 单级放大电路分析.....	358	3. 示波管.....	367
4. 场效应管放大器与晶体管(双极型) 放大器的比较.....	360	4. 校准信号.....	367
复习思考题和习题.....	361	13.4 SB-05A型示波器电路分析.....	367
<b>*第十三章 阴极射线示波器.....</b>	<b>353</b>	1. Y轴系统.....	367
13.1 阴极射线示波管.....	353	2. X轴系统.....	370
1. 热丝和阴极.....	363	3. 电源.....	373
2. 控制极.....	363	4. 显示器.....	373
3. 第一阳极和第二阳极.....	364	5. 校准信号发生器.....	375
4. 垂直偏转板和水平偏转板.....	364	复习思考题和习题.....	375
5. 荧光屏和第三阳极.....	365	附录 I 线性电路.....	376
6. 示波管 8SJ42J 的主要技术指标.....	365	附录 II 均分定理.....	385
13.2 SB-05A型示波器的结构.....	365	附录 III 场效应管放大器低频截止 频率关系式的证明.....	387
13.3 SB-05A型示波器的主要技术指标.....	367	附录 IV 增益的分贝表示法.....	389
1. Y轴.....	367	附录 V 半导体器件命名方法.....	390



# 第一章 晶 体 管

## 1.1 半导体的导电特性

### 1. 半导体的特点

铜、银、铝等金属材料是很容易导电的，称之为导体；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  $10^{-6}$ — $10^{-4}$  欧·厘米的范围内。例如铜的电阻率为  $1.57 \times 10^{-6}$  欧·厘米。绝缘体的导电能力很差，电阻率很高，在  $10^{10}$ — $10^{18}$  欧·厘米的范围内。例如橡胶的电阻率为  $10^{18}$  欧·厘米。

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，它既不像导体那样容易导电，也不像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  $10^{-3}$ — $10^{10}$  欧·厘米。例如纯锗在室温时电阻率为 47 欧·厘米。

半导体之所以引起人们的注意，得到广泛的应用，其主要特点不是由于电阻率在数值上与导体和绝缘体的差别，而在于它的电阻率在各种因素（掺杂、光照等）作用下有非常大的差别。第一，半导体的电阻率随温度上升而迅速下降；而金属的电阻率随温度升高而增加。例如铜，温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，电阻率增加 0.4%；而纯锗温度从  $20^{\circ}\text{C}$  升到  $32^{\circ}\text{C}$ ，电阻率下降一半。第二，掺杂影响显著。在金属导体中如果掺入很少杂质，其电阻率增加，但是变化不大。半导体却不同，在纯净的半导体中掺入微量的适当杂质能使电阻率显著降低。例如在一块纯锗中加入百万分之一的硼，锗的电阻率就从 47 欧·厘米减小到 1 欧·厘米左右。不仅如此，选择不同类型的杂质，还可以改变半导体的导电类型，形成 *P* 型、*N* 型两种导电类型。利用半导体掺杂后的这种独特性质，能够制造出各种不同用途的半导体器件。锗(Ge)、硅(Si)、砷化镓(GaAs)等是常用的半导体材料。

### 2. 本征半导体

纯半导体也称为本征半导体。半导体为什么会具有以上特点，这就需要从它的内部导电机构来说明。先从最简单的本征半导体讨论起。

原子构成物质时，各原子间是以一定的作用力互相结合起来的。纯锗、纯硅等本征半导体材料的原子排列很整齐、规则，它们的晶格平面结构如图 1.1.1 所示。每个锗或硅原子最外层的四

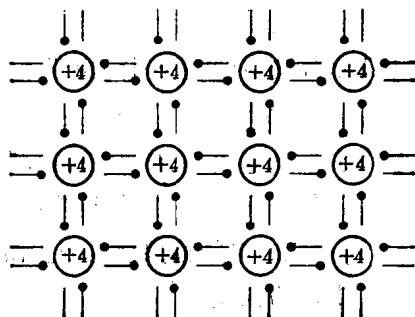


图 1.1.1

个电子叫做价电子。每个原子各拿出一个价电子和它相邻的一个原子共有，也就是每两个相邻

原子之间共有一对价电子。这对价电子既受本身原子核的吸引,又受相邻原子核的吸引,从而将这两个原子紧紧地束缚在一起,形成共价键结构。这种共有价电子的束缚作用叫做共价键。锗和硅都是四价元素,最外层四个价电子正好和四个相邻原子的价电子组成四对共有电子对,即构成四个共价键。共价键中的电子处于束缚状态,被束缚在这两个原子附近,不能自由移动,不是自由电子。对于每个原子来说都呈电中性,所以从整块半导体来看是由大量中性原子构成的,所带正负电荷数目相同,呈电中性。

在一定温度下晶体中的原子不断地在自己平衡位置附近作热运动,温度越高这种热运动就越剧烈。所以本征锗、硅晶体中的价电子一方面处于共价键的束缚之中,另一方面又同时从原子的热运动中获得能量。当价电子从原子的热运动中获得足够的能量时,便从束缚状态激发到自由状态,成为自由电子,如图 1.1.2 所示。这种由于热运动使本征半导体的价电子脱离共价键而成为自由电子的过程叫做热激发或本征激发。

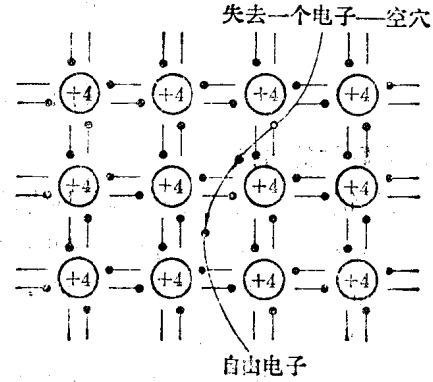


图 1.1.2

本征激发与温度有密切关系。在一定的温度下,就有一定数量的价电子被激发成为自由电子。

在本征激发过程中,硅晶体某个共价键上的电子激发成自由电子后,在原来的共价键中就留下一个空位,这个空位叫做空穴。空穴的出现,使原来是电中性的硅原子成为一个带正电的正离子。因此可以认为这个正电荷为空穴所具有。这样,在本征激发下硅晶体同时形成了自由电子(带负电荷)与空穴(带正电荷)两种带电粒子,它们是相伴而生,成对出现的,称为电子—空穴对。若电子重新落入空穴,则电子—空穴对便消失,这种现象称为复合。在本征激发中,电子和空穴的浓度是相等的。设  $n$  = 电子数/厘米<sup>3</sup>,  $p$  = 空穴数/厘米<sup>3</sup>, 在本征半导体中有  $n = p = n_i$ ,  $n_i$  称为本征浓度。

由于空穴带正电荷,相邻共价键中的价电子有可能填补这个空穴,这个空穴便消失。与此同时却在相邻共价键中出现了一个新的空穴。这个新的空穴还会被别的共价键中的电子所填补,这种价电子接连不断地填补空穴的运动,相当于一个空穴从一处移到另一处。这种空穴的迁移运动和自由电子在键外的自由运动相似,使空穴成为能在半导体中自由运动的一种带电粒子。因此本征硅中(锗也一样)由于本征激发,同时存在自由电子和空穴两种异号电荷的带电粒子。在外电场作用下,自由电子逆电场方向作定向漂移运动,形成电流  $I_n$ ; 空穴顺电场方向作定向漂移运动形成电流  $I_p$ 。由于它们所带电荷异号,总电流为电子流  $I_n$  与空穴电流  $I_p$  之和,即:  $I = I_n + I_p$ 。自由电子和空穴都能运载电荷,统称为载流子。在外电场作用下,载流子的运动叫做漂移运动,所形成的电流称漂移电流。由于在常温下本征半导体中电子—空穴对很少,因此本征半导体的导电能力很差。

如上所述,在本征半导体中,导电机构是由空穴导电机构与电子导电机构构成的,因此本征半导体的电导率是由以下两种电导率组成,其一是自由电子定向运动所引起的电子性电导率,其

二为电子沿空穴位子的填补形成定向移动所引起的空穴性电导率，即本征电导率等于电子性电导率与空穴性电导率之和：

$$\sigma_i = \sigma_n + \sigma_p = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

式中： $q$ —电子电荷量； $n$ —电子浓度； $\mu_n$ —电子迁移率； $p$ —空穴浓度； $\mu_p$ —空穴迁移率。

虽然在本征导电中，电子浓度永远等于空穴浓度，但是由于电子的迁移率  $\mu_n$  大于空穴的迁移率  $\mu_p$ ，在温度  $T=300^\circ\text{K}$  时硅和锗的电子和空穴的迁移率如表 1.1.1 所示。所以在本征电导率中电子性电导率总是占主要优势。

表 1.1.1

物 质	$\mu_n$ (厘米 <sup>2</sup> /伏特·秒)	$\mu_p$ (厘米 <sup>2</sup> /伏特·秒)
硅	1400	500
锗	3900	1900

值得注意的是，在本征半导体中，本征激发和复合是同时存在的，本征激发使电子和空穴成对产生，复合则使电子和空穴成对消失。在一定温度下，激发和复合达到一定的动态平衡。此时虽然激发和复合仍在不断进行，但激发多少便复合多少，使电子—空穴对维持在一定数目上，这样一种状态叫做热平衡，这些一定数目的电子—空穴对称为平衡载流子。当环境温度升高时，热激发能量增加，激发超过了复合，破坏了原来的平衡，随着电子—空穴对的增多，它们相遇而复合的机会也增大，即复合也增多了，在一个新的条件下激发与复合达到了新的平衡。这时平衡载流子的浓度  $n_i$  保持在一个更高的水平上，从而半导体的导电能力也提高了。由于平衡载流子浓度  $n_i$  随温度升高是按指数规律非常迅速增加的，所以半导体的导电能力随温度上升而迅速增大。

应当注意，热运动并不是使半导体电导率增加的唯一原因，外界电场、光、伦琴射线以及放射性物质的辐射对半导体的电导率都有影响。

### 3. 杂质半导体

本征半导体的导电能力很差，实际上用处不大。但如果在本征半导体中有选择地掺进微量的某种杂质元素，即加入少许在化学成份上不同的物质，可以使半导体的电导率显著改变。随着掺进杂质元素的不同，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

先讨论在四价元素硅或锗中加入五价元素磷(P)、砷(As)或锑(Sb)的杂质。这时杂质原子可以处在晶格点阵节点的位置上代替原来的硅原子，并以自己的价电子和相邻原子组成共价键，这时杂质原子提供给共价键四个电子后，尚多余一个电子，因此每一个杂质原子中总有一个未参加共价键的“多余的”电子，而这个“多余的”电子与原子核的联系比其他价电子要弱得多。

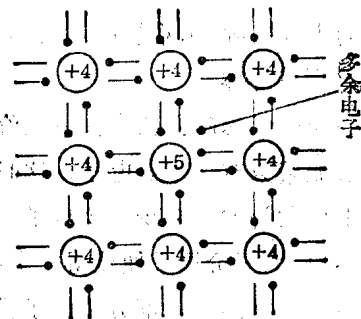


图 1.1.3

图 1.1.3 为在硅晶体中加入磷原子的示意图。每个磷原子的五个价电子中的四个与相邻的四个硅原子组成共价键后,多余的这个价电子受原子核的吸引力很小,只要极小的能量就可以使这个多余的电子摆脱这种吸引而成为自由电子。这种使价电子游离成为自由电子的能量称为价电子的电离能,硅中掺入五价杂质磷后,电离能为 0.044 电子伏特,而本征硅的价电子的激活能为 1.1 电子伏特,因此只要很小的热激发或其它外界影响就足以使这个多余电子脱离磷原子而变成自由电子。在室温下这些杂质原子差不多都是电离的,杂质原子电离后因失去一个电子而成为正离子。每掺入一个磷原子可以放出一个自由电子,故把这类杂质叫做施主杂质。

在本征激发中,电子空穴是成对出现的。而在掺入施主杂质后的半导体中,施主原子放出多余电子后只留下不能移动的正离子,它与周围相邻的硅原子所构成的共价键并不增加空穴,从而使杂质半导体中电子浓度大大超过空穴浓度,因而电子性导电占优势,所以称为电子型半导体或 *N* 型半导体。

在常温下的杂质半导体中,杂质电离和本征激发是同时存在的。即 *N* 型半导体中除了施主杂质放出的大量自由电子外,还有极少数由于本征激发而形成的电子—空穴对。例如在室温下,硅原子浓度约为  $5 \times 10^{22}$  / 厘米<sup>3</sup>,若掺杂浓度为亿分之一,则施主浓度约为  $5 \times 10^{14}$  / 厘米<sup>3</sup>,而由于本征热激发产生的电子—空穴对的浓度  $n_i$  仅为  $1.5 \times 10^{10}$  / 厘米<sup>3</sup>,远小于施主浓度。

所以 *N* 型半导体中参与导电的载流子主要是来自施主杂质电离后所放出的自由电子。并且由于 *N* 型半导体中自由电子数目大大增加,使得电子与空穴复合的机会增大,使得空穴浓度低于本征半导体中的空穴浓度。在一定温度下, *N* 型半导体中导电电子浓度  $n$  和空穴浓度  $p$  及本征载流子浓度  $n_i$  之间的关系为:

$$p \times n = n_i^2$$

则空穴浓度  $p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{5 \times 10^{14}} = 4.5 \times 10^5$  / 厘米<sup>3</sup>,即只有自由电子浓度的  $\frac{1}{10^9}$ ,故在 *N* 型半导体中电子和空穴不仅不是成对出现,而且相差极为悬殊。为了便于区别,在 *N* 型半导体中的电子称为多数载流子,空穴称为少数载流子。

锗在室温下本征载流子浓度  $n_i = 2.5 \times 10^{13}$  / 厘米<sup>3</sup>,若掺杂浓度也为  $5 \times 10^{14}$  / 厘米<sup>3</sup>,则此时少数载流子空穴浓度  $p = \frac{n_i^2}{n} = 1.25 \times 10^{12}$  / 厘米<sup>3</sup>。可见在同样掺杂浓度情况下, *N* 型锗的少数载流子浓度比 *N* 型硅的少数载流子浓度大  $10^6$  数量级。以后会看到,少数载流子是晶体管反向饱和电流的主要来源。不难想像,硅管的反向饱和电流将远比锗管小。

## (2) *P* 型半导体

如果在四价元素硅或锗中掺进三价元素硼(B)、铝(Al)或铟(In)等,便发生另外一种情况,由于硼等三价元素只有三个价电子,这时三价原子占据原来四价元素的位置并与相邻四个四价元素的原子形成共价键时缺少一个电子,如图 1.1.4 所示。这样相邻的四价原子的价电子就很容易填补这个空位,而三价原子便获得一个电子成为带负电的离子。例如在硅中掺入硼后,电离能为 0.045 电子伏特,常温下大部分价电子都具有大于这个电离能的能量,每一个三价元素的原子都能接受一个价电子。所以,三价元素叫做受主杂质。每掺进一个三价原子便形成一个空穴,因此在

掺有受主杂质的半导体中，除了极少数的本征激发载流子外，还有大量的受主杂质原子所贡献的空穴，此时空穴导电占优势，电子导电占劣势，称为P型半导体。在P型半导体中空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

### (3) 杂质补偿

如果在四价元素中，同时掺有施主杂质和受主杂质时，施主杂质所贡献的电子和受主杂质所贡献的空穴是相互起补偿作用的。若这两种杂质的浓度相等时，则只有本征激发的电子—空穴对参与导电。若施主杂质占优势，电子和空穴复合掉一部分后还多出一部分电子参与导电，则叫N型半导体。若受主杂质占优势则叫P型半导体。

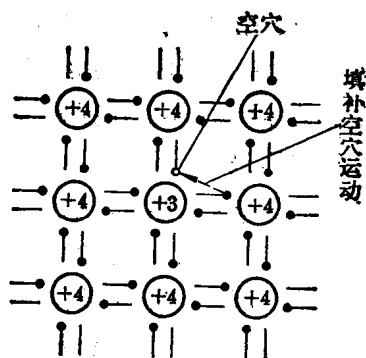


图 1.1.4

## 1.2 PN 结

如果把P型半导体和N型半导体通过一定的工艺制造在一起，在它们的接触面上就形成了PN结。PN结具有特殊的导电性能，它不仅和导体、绝缘体不同，而且和单块的P型半导体或N型半导体也截然不同。它是半导体器件中最基本的结构之一。

### 1. PN 结的形成

所谓PN结就是P型和N型半导体接触界面所形成的一个特殊薄层，在薄层的两边，一边是P区，另一边是N区，在P区里有大量的空穴，在N区里只有本征激发所产生的极少量的空穴。同样，在N区里有大量的电子，在P型区里只有极少量数的电子。这样便在P区到N区中存在载流子的浓度梯度，载流子就要从浓度大的地方向浓度小的地方扩散。在扩散时，首先是靠近界面附近P区的空穴进入N区，与N区的多数载流子电子复合，结果在交界面的P区一侧的空穴减少，出现一层带负电的受主杂质离子区。同样，靠近交界面的N区一侧的电子进入P区，与P区的多数载流子空穴复合，结果在交界面的N区一侧的电子减少，出现了一层带正电的施主杂质离子区。于是在界面两侧形成了一个空间电荷区，即所谓PN结。这个区域不再是电中性的，在P区一侧带负电，在N区一侧带正电如图1.2.1所示。随着这两个带异号电荷层的形成，在空间电

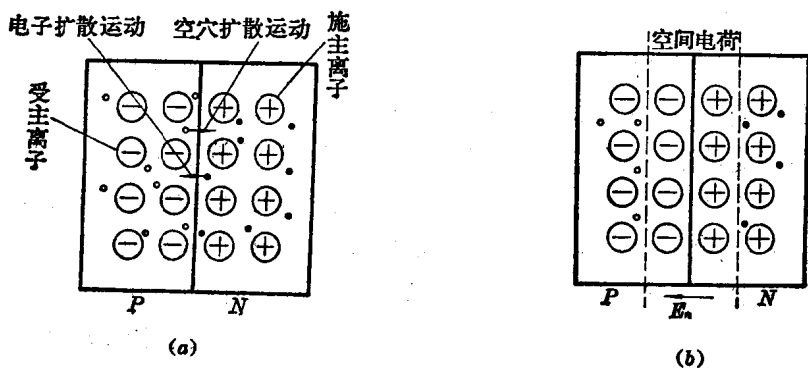


图 1.2.1

荷区内形成了一个由正电荷层指向负电荷层的很强的电场，叫做内建电场或自建电场。在空间电荷区以外的P区和N区仍为电中性区，不存在电场。

显而易见，内建电场的存在对空穴和电子的扩散运动是起阻碍作用的。对空穴来说，扩散作用是使它从P区进入N区，而内建电场的作用却是使它回到P区，内建电场的这种作用叫做漂移作用。对电子来说则相反。也就是说由于载流子浓度差异而形成的扩散作用与由空间电荷区所形成的漂移作用是互相对立的，使得空穴和电子不能在整块半导体内的浓度达到均匀分布。

在扩散刚开始的时候，扩散作用大于漂移作用，扩散源源不断进行。随着扩散的进行，空间电荷区逐渐加宽，漂移作用逐渐增强，扩散运动逐渐减弱。当空间电荷区增大到一定宽度使得扩散作用和漂移作用相等时，扩散运动和漂移运动达到了动态平衡。这时有多少电子从N区扩散到P区，同时也就有这么多电子从P区漂移到N区，空穴也是如此。这空间电荷区的宽度约为几微米~几十微米不再增加，内建电场也就不再增强了，P区和N区的接触界面处于平衡状态。

空间电荷区又称为阻挡层，意思是阻挡载流子的扩散运动。在阻挡层中既然存在内建电场，于是在阻挡层两侧就存在电势差，叫做接触电势差。接触电势差的大小不仅取决于两种半导体的掺杂情况，而且与温度有关。硅N型和P型半导体的接触电势差大约为0.7伏左右，锗则为0.2伏左右，因此空间电荷区又称为势垒区。

## 2. PN结加正向电压

如果在一个PN结上加正向电压，即外加电源正极接P区，负极接N区，如图1.2.2所示。这时外加正向电压在阻挡层中所建立的外电场 $E_n$ 和阻挡层中的内建电场 $E_p$ 方向相反，从而削弱了内建电场，势垒下降，有利于多数载流子的扩散，于是P区的多数载流子空穴能顺利通过PN结阻挡层扩散到N区去。空穴对N区来说是少数载流子，而N区在一定温度下存在一定浓度的少数载流子空穴(称为热平衡载流子)，当P区的大量空穴越过PN结界面到达N区时，使N区空穴浓度超过了热平衡时的浓度，这些超过的部分叫做非平衡载流子。N区的多数载流子电子向P区扩散，也有同样的情况。这种在正向电压作用下势垒下降，通过载流子的扩散，在势垒区两侧引入了非平衡少数载流子的过程，称为非平衡少数载流子注入。

非平衡少数载流子注入的结果，势垒区两侧形成了少数载流子的积累。即N区一侧积累了过量的空穴，P区一侧积累了过量的电子，这些积累的非平衡少数载流子是不能久留的，P区一侧积累的电子将向P区体内扩散，N区一侧积累的空穴将向N区体内扩散。这些电子、空穴在扩散过程中逐渐和多数载流子复合而消失。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多数载流子必须由电源来补充。这就是在外加正向电压下空穴扩散电流和电子扩散电流通的过程。

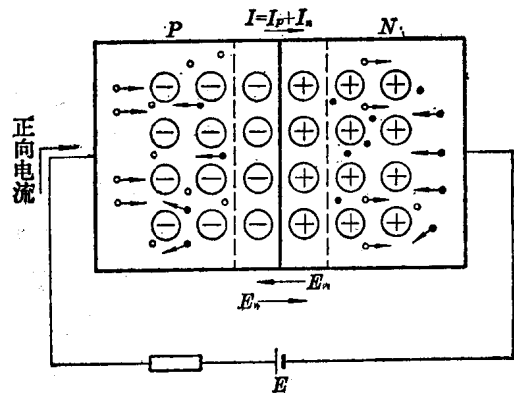


图 1.2.2

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  $I_p$  与电子扩散电流  $I_n$  的方向是相同的，都是由  $P$  区指向  $N$  区，总扩散电流  $I$  等于空穴扩散电流与电子扩散电流之和，即

$$I = I_p + I_n$$

当外加电压升高时，势垒区的内建电场进一步被削弱，势垒进一步下降，势垒区变薄，扩散作用更加占优势，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，此时  $PN$  结的电阻较小。

### 3. $PN$ 结加反向电压

如果在  $PN$  结上加反向电压，即  $P$  区接电源的负极， $N$  区接电源的正极，如图 1.2.3 所示。这时外加反向电压在阻挡层中形成的电场和内建电场的方向一致，加强了空间电荷区的电场强度，阻挡层的厚度也就比平衡时宽，使多数载流子的扩散运动难于进行。但是空间电荷区电场强度的加强却有利于少数载流子的漂移运动。 $P$  区的

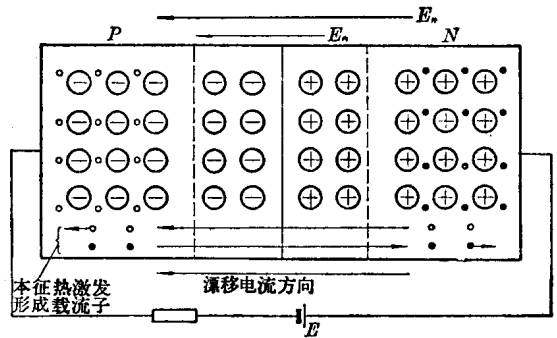


图 1.2.3

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  $I_{n,p}$ 。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  $I_{p,n}$ 。总漂移电流为：

$$I_s = I_{n,p} + I_{p,n}$$

但由于少数载流子的浓度很小，即使它们全部漂移，其漂移电流  $I_s$  还是很小的。故此时  $PN$  结的电阻很大。

### 4. $PN$ 结的伏安特性

根据半导体物理可以推导出  $PN$  结的伏安特性近似公式为：

$$I = I_s (e^{\frac{qU}{kT}} - 1) \quad (1.2.1)$$

其中  $q = 1.602 \times 10^{-19}$  库仑，为电子电荷量。 $k = 1.38 \times 10^{-23}$  焦耳/K，为波耳兹曼常数。 $T$  是绝对温度，单位为 K。 $U$  为  $PN$  结电压，正向工作时为正值，反向工作时为负值。

由(1.2.1)式可知，当反向电压达到一定数值时，使得  $e^{\frac{qU}{kT}} \ll 1$  时， $I \approx I_s$ ，是个固定数值，叫做反向饱和电流。

在室温  $27^\circ\text{C}$  即  $T = 273 + 27 = 300$  K 时，

$$\frac{kT}{q} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.602 \times 10^{-19}} = 26\text{mV} \quad (1.2.2)$$

所以一般只要正向电压  $U \gg 26\text{mV}$  时， $e^{\frac{qU}{kT}} \gg 1$ ，从而(1.2.1)式可简化为：

$$I = I_s e^{\frac{qU}{kT}} \quad (1.2.3)$$

此时通过  $PN$  结的正向电流随  $PN$  结上的正向电压按指数函数迅速增长。和(1.2.1)式对应的伏

安特性曲线如图 1.2.4 所示。图中横坐标轴表示加在  $PN$  结上的电压；纵坐标轴表示流过  $PN$  结的电流。加正向电压时，电流随电压上升很快，当  $\frac{qU}{kT} \gg 1$  时，电流随电压按指数规律变化；加反向电压时，电压在较大范围内变化而电流几乎不变，即保持反向饱和电流  $I_s$  的数值。但当电压达到  $U_B$  后反向电流随电压的增加而迅速增加， $PN$  结击穿，电压  $U_B$  称为击穿电压。 $PN$  结击穿后的伏安特性不符合 (1.2.1) 式。

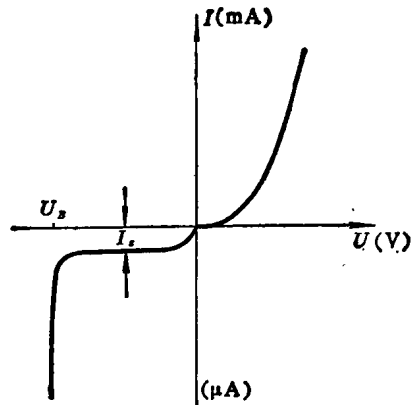


图 1.2.4

上面所分析的  $PN$  结反向电流，仅仅是从理想情况来考虑的，即把反向电流看作是  $PN$  结两侧由于热激发所产生的少数载流子电流。这种考虑对于锗  $PN$  结比较符合；但对于硅  $PN$  结却有很大误差，实验结果表明，一个实际的平面型硅  $PN$  结在反向电压作用下，势垒区热激发所产生的电子—空穴对所形成的电流及由于表面漏电所形成的漏电流在反向电流中起主导作用。

反向饱和电流的大小与半导体材料的性质和环境温度有关，小功率管在常温下，锗的  $PN$  结是微安级，而硅的  $PN$  结仅为纳安数量级，比锗  $PN$  结小得多。而反向饱和电流随温度升高是按指数规律急剧变化的，一般说来锗  $PN$  结的反向饱和电流，温度每升高  $12^\circ\text{C}$  其反向电流增加一倍；而硅  $PN$  结则在温度每升高  $8^\circ\text{C}$  时反向电流增加一倍。

反向饱和电流是衡量  $PN$  结优劣的重要质量指标之一，反向饱和电流愈大，则  $PN$  结的质量愈差。

从图 1.2.4 可以清楚的看到： $PN$  结正向运用时，有一定电流流过，并且随外加电压升高电流迅速增大；但反向运用时，电流很小（可以忽略不计），并且反向饱和电流与外加电压关系不大。这个特点称为  $PN$  结的单向导电性。

### 5. $P^+N$ 结与 $PN^+$ 结

在  $PN$  结中，如果  $P$  区与  $N$  区的掺杂浓度相同，称为对称结。实际  $PN$  结都是非对称的，在非对称结中， $P$  区和  $N$  区所掺杂浓度相差悬殊，通常把杂质浓度高的区域在代表符号右上角注以“+”号。例如  $P$  区受主杂质浓度远大于  $N$  区施主杂质浓度时，称为  $P^+N$  结， $P$  区称为重掺杂区。反之如果  $N$  区施主杂质浓度远大于  $P$  区受主杂质浓度时则称为  $PN^+$  结， $N$  区为重掺杂区。

非对称结的单向导电的原理，结电流表达式及伏安特性曲线都是与对称结相同的，但正向电流可以看成主要由重掺杂区的多数载流子的扩散运动构成的。例如  $P^+N$  结，在正向工作时， $P$  区空穴向  $N$  区扩散是主要的，而  $N$  区电子向  $P$  区扩散则可忽略不计。所以非对称结的正向电流以一种载流子的电流为主。



### 1.3 PN 结的击穿

由图 1.2.4 可以看到,当加在  $PN$  结的反向电压不大时,反向电流很小。但是,如果所加反向电压达到某一定数值,例如达到  $U_B$  时,反向电流突然变得很大,这种现象叫做  $PN$  结的击穿,  $U_B$  称为击穿电压。击穿有齐纳击穿和雪崩击穿两种。

#### 1. 齐纳击穿

当反向电压增大到一定程度时,空间电荷区内就会建立一个很强的电场。这个强电场能把价电子从共价键中拉出来,从而在空间电荷区产生大量电子—空穴对。这些电子—空穴对产生后,空穴被强电场驱到  $P$  区,电子被强电场驱到  $N$  区,使反向电流猛增。这种由于强电场的作用,直接产生大量电子—空穴对而使反向电流剧增的现象叫做齐纳击穿。

齐纳击穿常发生在掺杂浓度比较高的  $PN$  结中,因为此时空间电荷层比较薄,一个很小的反向电压就可以在空间电荷区内建立一个很强的电场(通常高达  $10^6 \text{V/cm}$ )。

当温度升高时,电子热运动加剧,较小的反向电压就能把价电子从共价键中拉出来,所以温度上升时,击穿电压下降,也就是说,齐纳击穿具有负的温度系数。

#### 2. 雪崩击穿

雪崩击穿是由于少数载流子在空间电荷区内和半导体原子的碰撞而产生的。

当  $PN$  结的反向电压增大到某一数值时, $PN$  结中的电场变得很强,在空间电荷区中因本征热激发而产生的少数载流子受强电场的加速作用而动能很大,它们在运动途中和半导体原子(例如硅原子)碰撞时可以把硅原子共价键上的价电子碰撞出来而发生碰撞电离,产生电子—空穴对,原来的少数载流子在电场作用下继续作定向运动,新生的载流子也以足够的动能作定向运动,在运动途中还可以碰撞硅原子,再次发生碰撞电离,形成更多的电子—空穴对。这样连锁反应的结果,使载流子迅速倍增,反向电流突然增大。这种由于载流子与硅原子碰撞,使得载流子雪崩式地增长而使反向电流剧增的现象叫做雪崩击穿。

与齐纳击穿相反,雪崩击穿具有正的温度系数,即温度升高时,所需击穿电压也要增大,因为温度升高时,原子无规则热运动剧增,使电子定向运动更困难,必须加大反向电压,才能使少数载流子具有碰撞电离所需要的能量。

根据  $PN$  结的制造工艺不同和掺杂浓度不同,击穿电压差别很大,小的只有 1 伏左右,大的可达千伏以上。一般说来,击穿电压在 5 伏以下多为齐纳击穿,在 7 伏以上多为雪崩击穿,击穿电压在 5—7 伏之间常常两种击穿兼而有之。

对于一个具体的  $PN$  结,温度一定时,击穿总是在同一电压下发生。 $PN$  结击穿后,只要不是因为电流过大而烧毁,并不损坏  $PN$  结。

### 1.4 PN 结的电容

半导体器件工作在交流状态时,有一个极其重要的特征,这就是器件的性能随工作频率升高而变坏,甚至完全丧失其正常的工作能力。分析表明,限制器件频率特性的主要因素之一就是