

高等学校教材

DIANZIJIISHUJICHU

电子技术基础

黄庆元 主编



陕西师范大学出版社

高等学校教材

电子技术基础

黄庆元 主编



陕西师范大学出版社

主 编 黄庆元

副主编 钱如竹 鬲淑芳 李宗领 寥运策

编 委 孔祥羽 李 捷 赵连强 杜 凯

李德荣 贡文武 汪逸新 邱双安

主 审 王 珏 林融如

顾 问 刘荣汉 石邦恒 杨伦铭

电 子 技 术 基 础

黄庆元 主编

*

陕西师范大学出版社出版

(西安市陕西师大120信箱)

陕西省新华书店经销 西安电子科技大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 21.75 插页 4 字数 545 千

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数: 1—9 000

ISBN 7-5613-0317-3

G·275 定价: 7.60元

前 言

根据高等师范院校 1989 年颁布的《电子技术基础与实验》教学大纲精神，为适应科学技术的新发展和教学改革的需要，我们在 1985~1988 年所编两轮教材的基础上（此教材已经过全国近百所师范院校的使用），重新修改编写了这套适用于师范院校的电子技术新教材。内容包括《电子技术基础》、《电子技术基础实验》及与之配套的《电子技术基础学习指导》共三册。

本书为《电子技术基础》，全书共十一章，主要包括模拟电路与数字电路两大部分，并对黑白、彩色电视接收机的基本原理，也作了简要地介绍。适合师范院校本科 120 学时（含打*号部分）专科 80 学时（不含打*号部分）教学使用；也可供函授大学、电大、夜大、自修大学等成人教育电子类专业使用；对于职业技术学校电子类专业也可作学习参考教材。

本书在编写的过程中，主要着眼于师范院校的培养目标和特点，注意精选内容，力求将重点放在基本概念、基本理论的阐述与分析和基本技能、自学能力的培养上。为此，删减了大量陈旧繁琐的内容，加强了基本训练，注重了理论联系实际，加强了集成电路、数字电路部分的比重，同时，还增加了不少体现科学技术发展的新内容。

参与本书部分内容编写工作的还有洪 钢、赵煜东、尹振华、奕延虎、王志辉、牟 猛、蒋 中、丁福庆、王银仓、杨令邑等老师。

参加本书审稿工作的有张铭声、王继仁、张兴才、聂存祥、汪广深、闪郁昌、杨炎忠、徐克服、贾风图、熊继文、郭文达、黄开国、王忠堂、沈登湘、袁裕文、沈文忠、张威虎、马学坤、于 历、陈 蕴、赵 秋、王佩武、穆 军、解险峰、赵宗荣、郑景华、萧 清、麻幼学等老师，他们对本书的初稿提了不少宝贵意见，在此一并致谢。

由于编者水平所限，错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

一九八九年十月于西安

目 录

第一章 半导体器件

§ 1.1 半导体的导电特性	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 本征半导体的导电特性	1
1.1.3 杂质半导体的导电特性	2
1.1.4 PN 结	3
§ 1.2 晶体二极管	5
1.2.1 二极管的结构与伏安特性	5
1.2.2 二极管的主要参数	6
* 1.2.3 二极管的等效电路与开关特性	7
1.2.4 稳压二极管	9
§ 1.3 晶体三极管	9
1.3.1 三极管的结构与分类	9
1.3.2 三极管内部载流子的运动规律、电流分配关系和放大作用	10
1.3.3 三极管的特性曲线	13
1.3.4 三极管的主要参数	15
* 1.3.5 三极管的开关特性	16
§ 1.4 场效应管	18
1.4.1 结型场效应管	18
1.4.2 绝缘栅型场效应管	20
* § 1.5 特殊半导体器件	23
1.5.1 发光二极管	23
1.5.2 光敏二极管和光敏三极管	24
练习题	25

第二章 基本放大电路

§ 2.1 基本放大电路的工作原理	28
2.1.1 基本放大电路的组成	28
2.1.2 直流通路与静态工作点	29
2.1.3 交流通路和放大原理	30
2.1.4 放大电路的性能指标	31
§ 2.2 放大电路的图解分析法	33
2.2.1 放大电路的静态图解分析	33
2.2.2 放大电路的动态图解分析	34

2.2.3 输出电压的最大幅度与非线性失真分析	36
§ 2.3 微变等效电路分析法	37
2.3.1 晶体管的 h 参数	37
2.3.2 晶体管的微变等效电路	38
2.3.3 用微变等效电路法分析放大电路	39
§ 2.4 静态工作点的稳定	43
2.4.1 温度变化对静态工作点的影响	43
2.4.2 工作点稳定的电路	43
§ 2.5 场效应管放大电路	45
2.5.1 场效应管放大电路的静态分析	45
2.5.2 场效应管的微变等效电路	47
2.5.3 利用微变等效电路计算 A_v 、 r_i 、 r_o	47
§ 2.6 多级放大电路	49
2.6.1 多级放大电路的级间耦合方式	50
2.6.2 多级放大电路的分析方法	51
§ 2.7 放大电路的频率特性	53
2.7.1 单级阻容耦合放大电路的频率特性	53
2.7.2 多级阻容耦合放大电路的频率特性	55
§ 2.8 功率放大电路	56
2.8.1 甲类单管功率放大电路	57
2.8.2 互补对称功率放大电路	58
*2.8.3 变压器耦合推挽功率放大电路	64
练习题	64

第三章 负反馈放大电路

§ 3.1 反馈的基本概念和分类	70
3.1.1 反馈的基本概念和一般表达式	70
3.1.2 反馈放大电路的类型与判断	72
§ 3.2 负反馈放大电路基本类型举例	74
3.2.1 电压串联负反馈放大电路	74
3.2.2 电流并联负反馈放大电路	75
3.2.3 电流串联负反馈放大电路	76
3.2.4 电压并联负反馈放大电路	77
§ 3.3 负反馈对放大电路性能的影响	78
3.3.1 降低放大倍数	78
3.3.2 提高放大倍数的稳定性	78
3.3.3 展宽通频带	79
3.3.4 减小非线性失真	79
3.3.5 改变输入电阻和输出电阻	80
§ 3.4 负反馈放大电路的分析方法	83

3.4.1 深度负反馈放大电路的近似计算	83
* 3.4.2 方框图法分析负反馈放大电路	86
练习题	89
第四章 集成运算放大电路	
§ 4.1 差动放大电路	93
4.1.1 直接耦合放大电路中的零点漂移	93
4.1.2 差动放大电路的基本形式	94
4.1.3 差动放大电路的改进	99
§ 4.2 集成电路基础	101
4.2.1 集成电路的特点	101
4.2.2 集成电路恒流源	101
4.2.3 有源负载的基本概念	103
§ 4.3 集成运放的典型电路及参数	103
4.3.1 典型集成运放 F007 电路简介	104
4.3.2 集成运放的主要技术参数	105
§ 4.4 集成运放的应用	107
4.4.1 概述	107
4.4.2 运放的基本连接方式	108
4.4.3 集成运放在信号运算方面的应用	110
* § 4.5 集成运放在使用中应注意的问题	113
练习题	114
第五章 直流电源	
§ 5.1 整流电路	118
5.1.1 半波整流电路和全波整流电路	118
5.1.2 桥式整流电路	120
5.1.3 倍压整流电路	121
§ 5.2 滤波电路	121
5.2.1 电容滤波电路	122
5.2.2 电感滤波电路	124
5.2.3 复式滤波电路	124
5.2.4 有源滤波电路	125
§ 5.3 稳压电路	125
5.3.1 并联型硅稳压管稳压电路	126
5.3.2 串联型稳压电路	126
5.3.3 稳压电源的质量指标	128
5.3.4 提高稳压电源性能的措施	129
5.3.5 开关式稳压电源	131
5.3.6 集成稳压电路	132
练习题	135

第六章 正弦波振荡电路

§ 6.1 自激振荡原理	139
6.1.1 自激振荡的条件	139
6.1.2 自激振荡的建立和振幅的稳定	140
6.1.3 正弦波振荡电路的组成	140
§ 6.2 LC 正弦波振荡电路	140
6.2.1 变压器反馈式振荡电路	140
6.2.2 三点式 LC 振荡电路	142
* § 6.3 石英晶体振荡器	145
6.3.1 石英晶体的基本特性和等效电路	145
6.3.2 石英晶体振荡电路	146
§ 6.4 RC 振荡电路	147
6.4.1 RC 移相振荡电路	148
6.4.2 文氏电桥振荡电路	149
练习题	151

第七章 调制、解调和变频

§ 7.1 调制方式	153
§ 7.2 调幅与检波	153
7.2.1 调幅原理与特点	153
7.2.2 调幅电路	156
7.2.3 检波	157
§ 7.3 调频与鉴频	160
7.3.1 调频	160
7.3.2 鉴频	163
§ 7.4 变频	167
7.4.1 变频原理	167
7.4.2 变频电路	167
* § 7.5 双差分模拟乘法电路	168
7.5.1 双差分电路的乘法特性	168
7.5.2 双差分模拟乘法电路应用举例	170
练习题	172

第八章 无线电广播与接收

§ 8.1 无线电波的传播	174
§ 8.2 超外差收音机	176
8.2.1 LC 谐振回路	176
8.2.2 输入回路	179
8.2.3 统调	180
8.2.4 中频放大电路	182
8.2.5 自动增益控制(AGC)电路	184

8.2.6 晶体管超外差收音机整机电路分析	185
8.2.7 集成电路收音机	186
* § 8.3 晶体管扩音机电路分析	189
* § 8.4 录音机	190
8.4.1 录放基本原理	190
8.4.2 晶体管录音机电路简介	192
练习题	195

第九章 脉冲与数字电路基础

§ 9.1 计数制	196
9.1.1 十进制	196
9.1.2 二进制	197
9.1.3 十进制数与二进制数的转换	198
9.1.4 八进制数与十六进制数	200
§ 9.2 基本逻辑关系和常用逻辑门	202
9.2.1 逻辑电路中的几个概念和规定	202
9.2.2 基本逻辑关系和逻辑门	203
9.2.3 复合逻辑门	205
9.2.4 OC 门和三态门	207
§ 9.3 逻辑代数基础	209
9.3.1 逻辑代数的基本定理与规则	210
9.3.2 几种逻辑函数表示方法的转换	211
9.3.3 逻辑函数的化简方法	214
§ 9.4 组合逻辑电路	216
9.4.1 编码器	216
9.4.2 译码器	217
9.4.3 半加器和全加器	219
§ 9.5 触发器	220
9.5.1 基本 RS 触发器	221
9.5.2 同步 RS 触发器	222
9.5.3 主从触发器	223
9.5.4 维持阻塞 D 触发器	226
9.5.5 T 触发器及不同类型触发器的相互转换	227
§ 9.6 时序逻辑电路	229
9.6.1 寄存器	229
9.6.2 计数器	231
§ 9.7 脉冲电路	235
9.7.1 脉冲电路的基本知识	235
9.7.2 简单的脉冲波形变换电路	236
9.7.3 多谐振荡器	239

9.7.4 单稳态触发器	241
9.7.5 双稳态触发器	243
9.7.6 间歇振荡器	243
§ 9.8 电子数字计算机简介	245
9.8.1 电子计算机的基本知识	246
9.8.2 微型计算机与微处理器	248
练习题	249

第十章 晶体管电视接收机

§ 10.1 电视发送的基本原理	253
10.1.1 电视信号的形成	253
10.1.2 扫描	254
10.1.3 全电视信号	255
10.1.4 电视信号的发射	256
10.1.5 显像管及偏转线圈	258
§ 10.2 晶体管黑白电视接收机	259
10.2.1 概述	259
10.2.2 高频调谐器	260
10.2.3 中频放大器	266
10.2.4 视频检波器和视频放大器	269
10.2.5 伴音电路	273
10.2.6 自动增益控制和抗干扰电路	275
10.2.7 同步分离和自动频率控制(AFC)电路	278
10.2.8 场扫描电路	282
10.2.9 行扫描电路	288
10.2.10 显像管附属电路	296
10.2.11 典型31cm晶体管黑白电视接收机电路分析	297
§ 10.3 集成电路黑白电视机	301
10.3.1 集成化图像中频通道	302
10.3.2 集成化伴音通道	305
10.3.3 集成化扫描电路	307
练习题	310

第十一章 彩色电视简介

§ 11.1 概述	312
11.1.1 三基色原理	312
11.1.2 摄像与显象	313
11.1.3 彩色电视制式	315
§ 11.2 NTSC 制彩色电视原理	315
11.2.1 色信号编码	315
11.2.2 大面积涂色原理——压缩色差信号频带	317

11.2.3 频谱间置	317
11.2.4 正交平衡调幅	318
11.2.5 彩色全电视信号 (FBAS)	320
11.2.6 解码与同步检波	321
§ 11.3 PAL 制彩色电视原理	322
11.3.1 PAL 制特点	322
11.3.2 PAL _D 解码	323
11.3.3 PAL _D 解码方框图	326
§ 11.4 彩色电视接收机	327
11.4.1 单通道超外差式彩色电视接收机	327
11.4.2 彩色电视接收机中常用的解码电路	327
11.4.3 金星 C ₃₇ -401 型集成彩色电视机解说	331
练习题	336
参考文献	337
附图 I 典型黑白电视接收机电路	
附图 II 典型集成电路黑白电视机电路	
附图 III 金星 C37-401 集成彩色电视机电路	

第一章 半导体器件

半导体器件，主要包括半导体二极管、三极管和场效应管。它是各种电子电路的核心部分。

构成半导体器件的核心是PN结，本章介绍PN结的形成及其导电特性，并在此基础上讨论半导体二极管、三极管及场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数。

§ 1.1 半导体的导电特性

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

自然界的各种物质就其导电性能来说，可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。导体具有良好的导电特性，常温下，其内部存在着大量的自由电子，它们在外电场的作用下做定向运动形成较大的电流。因而导体的电阻率很小，只有 $10^{-8} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。金属一般为导体，如铜、铝、银等。绝缘体几乎不导电，如橡胶、陶瓷、塑料等。在这类材料中，几乎没有自由电子，即使受外电场作用也不会形成电流，所以，绝缘体的电阻率很大，在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，如硅、锗、硒等，它们的电阻率通常在 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。半导体之所以得到广泛应用，是因为它的导电能力受掺杂、温度和光照的影响十分显著。如纯净的半导体单晶硅在室温下电阻率约为 $2.14 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ ，若按百万分之一的比例掺入少量杂质(如磷)后，其电阻率急剧下降为 $2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ，几乎降低了一百万倍。

半导体具有这种性能的根本原因在于半导体原子结构的特殊性。

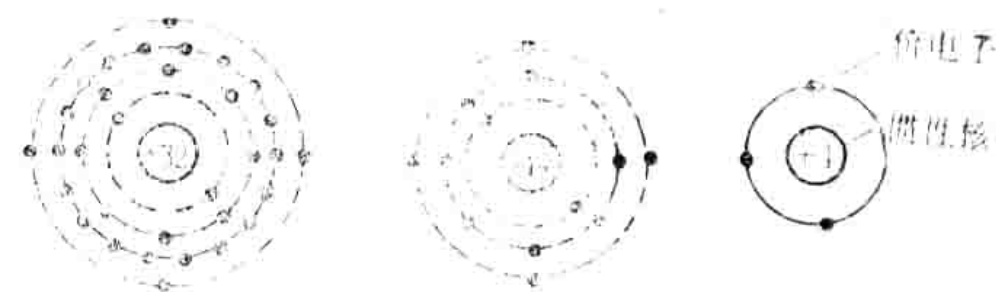
1.1.2 本征半导体的导电特性

常用的半导体材料是单晶硅(Si)和单晶锗(Ge)。所谓单晶，是指整块晶体中的原子按一定规则整齐地排列着的晶体。非常纯净的单晶半导体称为本征半导体。

一、本征半导体的原子结构

半导体锗和硅都是四价元素，其原子结构示意图如图 1.1.1(a)、(b)所示。它们的最外层都有 4 个电子，带 4 个单位负电荷。通常把原子核和内层电子看作一个整体，称为惯性核，如图 1.1.1(c)所示。

由图可见，锗原子和硅原子结构的简化模型完全相同，惯性核带有 4 个单位正电荷，最外层有 4 个价电子，带有 4 个单位负电荷，因此，整个原子为电中性。



(a) 锗(Ge) (b) 硅(Si) (c) 简化模型

图 1.1.1 锗和硅原子结构图

图1.1.2是本征硅晶体结构的平面示意图。由图可知它是原子晶体,各个原子彼此间距相等且整齐地排列起来,形成空间点阵。由于晶体中的原子与原子靠得很近,就使得每个原子最外层的4个价电子不仅受到所属原子核的吸引,而且还受到相邻原子核的吸引,使得一个价电子为相邻原子核所共有,从而形成了所谓“共有化运动”。这种结合方式称为共价键结构。共价键结构中每个原子最外层就等效地有8个价电子,从而形成了稳定状态,使价电子不易挣脱原子核的束缚。这正是本征半导体导电性能差的根本原因。

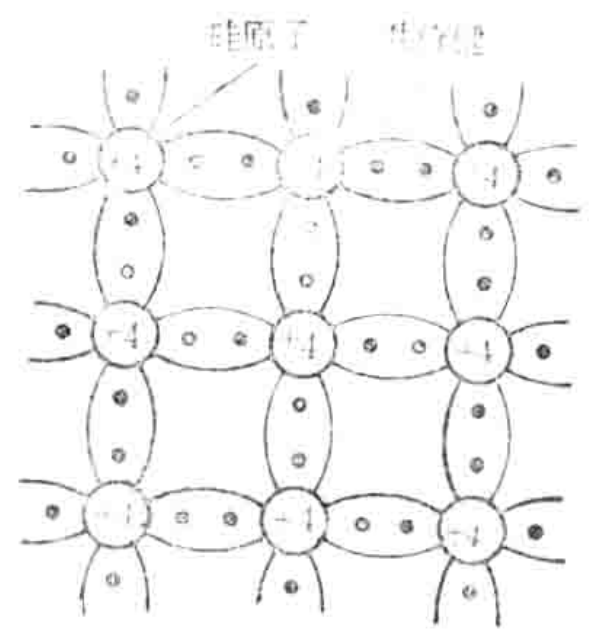


图 1.1.2 硅单晶的共价键结构

二、本征激发

本征激发与电子—空穴对

一般来说,共价键中的价电子不完全象绝缘体中价电子所受束缚那样强,如果能从外界获得一定的能量(如光照、升温、电磁场激发等),一些价电子就可能挣脱共价键的束缚而成为自由电子。

理论和实验表明:在常温($T=300\text{K}$)下,硅共价键中的价电子只要获得大于电离能 $E_G(=1.1\text{eV})$ 的能量便可激发成为自由电子。本征锗的电离能更小,只有 0.72eV 。

当共价键中的一个价电子受激发挣脱原子核的束缚成为自由电子的同时,在共价键中便留下了一个空位子,称为“空穴”。当空穴出现时,相邻原子的价电子比较容易离开它所在的共价键而填补到这个空穴中来,使该价电子原来所在共价键中出现一个新的空穴,这个空穴又可能被相邻原子的价电子填补,再出现新的空穴。价电子填补空穴的这种运动无论在形式上还是效果上都相当于带正电荷的空穴在运动,且运动方向与价电子运动方向相反。为了区别于自由电子的运动,把这种运动称为空穴运动,并把空穴看成是一种带正电荷的载流子。

显然,本征半导体中,空穴与自由电子同生共存,称为“电子—空穴对”,把本征半导体在热(或光照等)作用下产生“电子—空穴对”的现象称为本征激发,如图 1.1.3 所示。

在本征激发过程中,温度越高,产生的“电子—空穴对”越多。电子和空穴同时产生,成对出现,因此,它们的数量总是相等的。另一方面,当自由电子在运动过程中遇到空穴时可能会填充进去从而恢复一个共价键,与此同时消失一个“电子—空穴”对,这一相反过程称为复合。在一定温度条件下,产生的“电子—空穴对”和复合的“电子—空穴对”数量相等时,形成相对平衡,这种相对平衡属于动态平衡,达到动态平衡时,“电子—空穴对”维持一定的数目。

可见,在半导体中存在着自由电子和空穴两种载流子,而金属导体中只有自由电子一种载流子,这也是半导体与导体导电方式的不同之处。

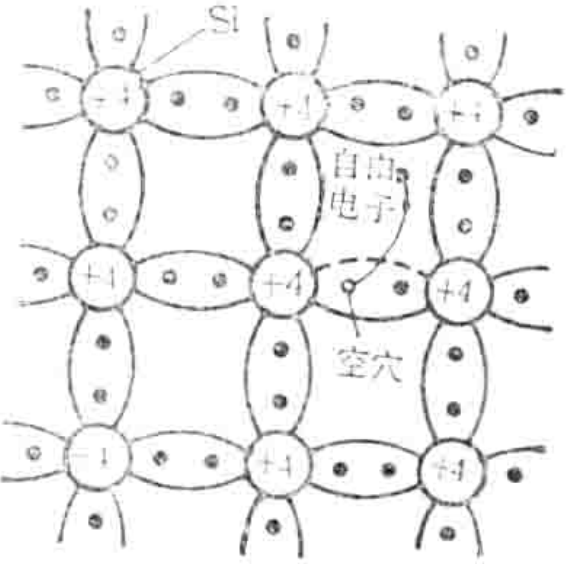


图1.1.3 本征激发产生的电子—空穴对

1.1.3 杂质半导体的导电特性

本征半导体的导电能力很弱,热稳定性也很差,因此,不宜直接用它制造半导体器件。半导体器件多数是用含有一定数量的某种杂质的半导体制成。根据掺入杂质性质的不同,杂

质半导体分为 *N* 型半导体和 *P* 型半导体两种。

一、*N* 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的 5 价元素, 例如磷, 磷原子就取代了硅晶体中少量的硅原子, 占据晶格上的某些位置。如图 1.1.4 所示。

由图可见, 磷原子最外层有 5 个价电子, 其中 4 个价电子分别与邻近 4 个硅原子形成共价键结构, 多余的 1 个价电子在共价键之外, 只受到磷原子对它微弱的束缚, 因此在室温下, 即可获得挣脱束缚所需要的能量而成为自由电子, 游离于晶格之间。失去电子的磷原子则成为不能移动的正离子。磷原子由于可以释放 1 个电子而被称为施主原子, 又称施主杂质。

在本征半导体中每掺入 1 个磷原子就可产生 1 个自由电子, 而本征激发产生的空穴的数目不变。这样, 在掺入磷的半导体中, 自由电子的数目就远远超过了空穴数目, 成为多数载流子(简称多子), 空穴则为少数载流子(简称少子)。显然, 参与导电的主要是电子, 故这种半导体称为电子型半导体, 简称 *N* 型半导体。

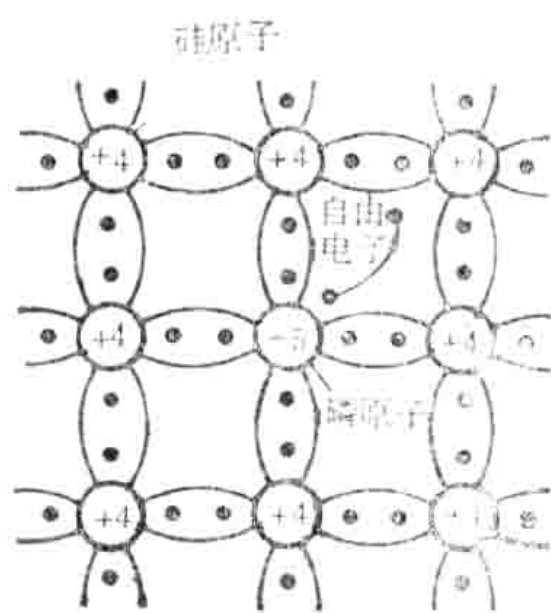


图 1.1.4 硅中掺磷形成 *N* 型半导体

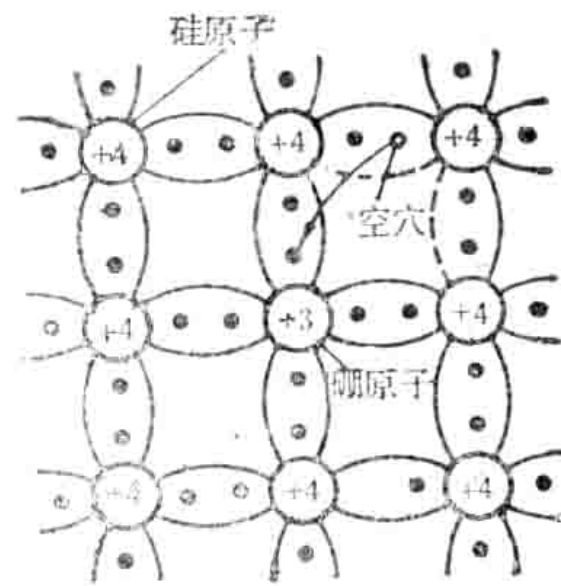


图 1.1.5 硅中掺硼形成 *P* 型半导体

二、*P* 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中, 若掺入微量的 3 价元素, 如硼, 这时硼原子就取代了晶体中的少量硅原子, 占据晶格上的某些位置, 如图 1.1.5 所示。由图可知, 硼原子的 3 个价电子分别与其邻近的 3 个硅原子中的 3 个价电子组成完整的共价键, 而与其相邻的另 1 个硅原子的共价键中则缺少一个电子, 出现了一个空穴。这个空穴被附近硅原子中的价电子来填充后, 使 3 价的硼原子获得了 1 个电子而变成负离子。同时, 邻近共价键上出现一个空穴。由于硼原子起着接受电子的作用, 故称为受主原子, 又称受主杂质。

在本征半导体中每掺入 1 个硼原子就可以提供一个空穴, 当掺入一定数量的硼原子时, 就可以使半导体中空穴的数目远大于本征激发电子的数目, 成为多数载流子, 而电子则成为少数载流子。显然, 参与导电的主要是空穴, 故这种半导体称为空穴型半导体, 简称 *P* 型半导体。

1.1.4 PN 结

一、PN 结的形成

在一块完整的硅片上, 用不同的掺杂工艺使其一边形成 *N* 型半导体, 另一边形成 *P* 型半导体, 那么在两种半导体交界面附近就形成了 PN 结, 如图 1.1.6 所示。由于 *P* 区的多数载流子是空穴, 少数载流子是电子; *N* 区多数载流子是电子, 少数载流子是空穴, 这就使交界面两侧明显地存在着两种载流子的浓度差。因此, *N* 区的电子必然越过界面向 *P* 区扩散, 并与 *P* 区界面附近的空穴复合而消失, 在 *N* 区的一侧留下了一层不能移动的施主正离子; 同样, *P* 区的空穴也越过界面向 *N* 区扩散, 与 *N* 区界面附近的电子复合而消失, 在 *P* 区的一

侧，留下一层不能移动的受主负离子，如图 1.1.6(b)所示。扩散的结果，使交界面两侧出现了由不能移动的带电极子组成的空间电荷区，因而形成了一个由 N 区指向 P 区的电场，称为内电场。随着扩散的进行，空间电荷区加宽，内电场增强，由于内电场的作用是阻碍多子扩散

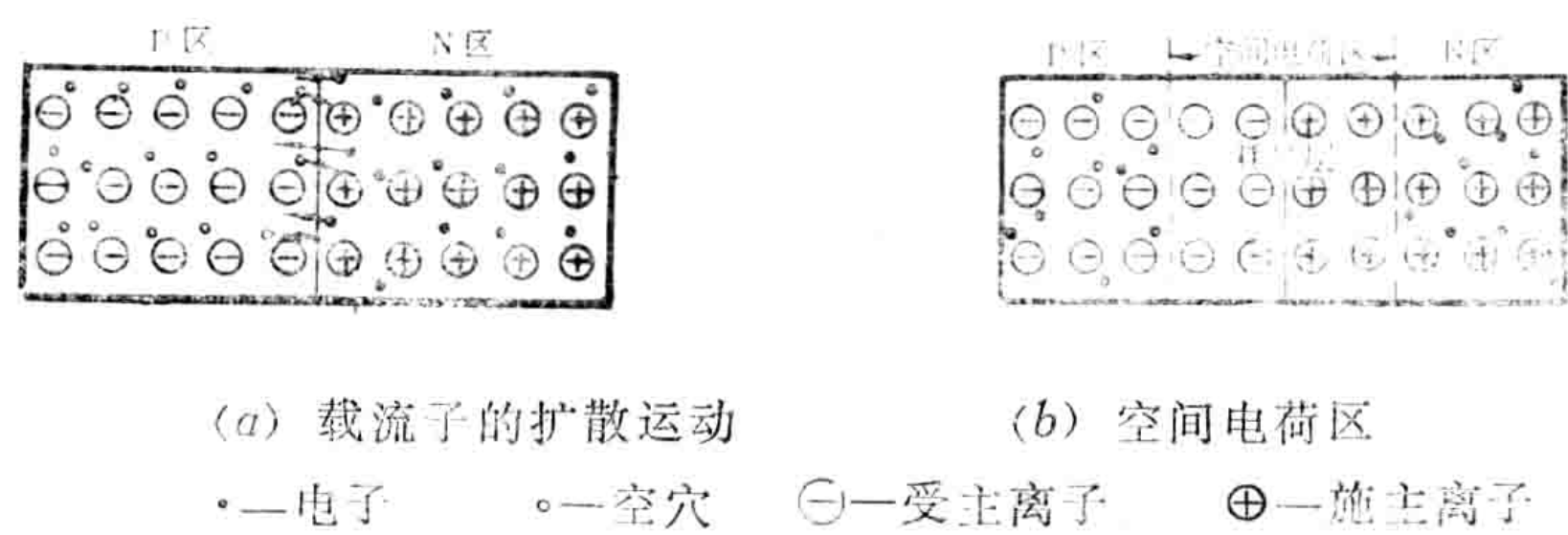


图 1.1.6 PN 结的形式

散，促使少子漂移，所以，当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时，将形成稳定的空间电荷区，称为 PN 结。由于空间电荷区内缺少载流子，所以又称 PN 结为耗尽层或高阻区。

二、PN 结的单向导电性

PN 结在未加外加电压时，扩散运动与漂移运动处于动态平衡，通过 PN 结的电流为零。

当电源正极接 P 区，负极接 N 区时，称为给 PN 结加正向电压或正向偏置，如图 1.1.7(a)所示。由于 PN 结是高阻区，而 P 区和 N 区的电阻很小，所以正向电压几乎全部加在 PN 结两端。在 PN 结上产生一个外电场 $E_{\text{外}}$ ，其方向与内电场 $E_{\text{内}}$ 相反，在它的推动下， N 区的电子要向左边扩散，并与原来空间电荷区的正离子中和，使空间电荷区变窄。同样， P 区的空穴也要向右边扩散，并与原来空间电荷区的负离子中和，使空间电荷区变窄。结果使内电场减弱，破坏了 PN 结原有的动态平衡。于是扩散运动超过了漂移运动，扩散又继续进行。与此同时，电源不断向 P 区补充正电荷，向 N 区补充负电荷，结果在电路中形成了较大的正向电流 I_F 。而且 I_F 随着正向电压的增大而增大。

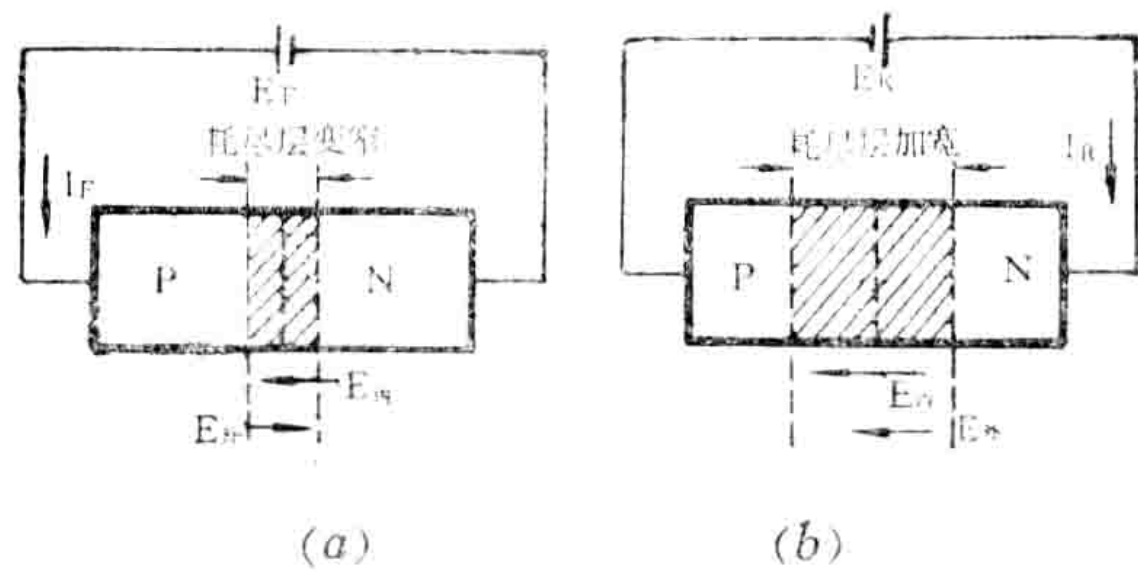


图 1.1.7 外加正、反向电压时的 PN 结

当电源正极接 N 区、负极接 P 区时，称为给 PN 结加反向电压或反向偏置，如图 1.1.7(b)所示。反向电压产生的外加电场 $E_{\text{外}}$ 的方向与内电场 $E_{\text{内}}$ 的方向相同，使 PN 结内电场加强，它把 P 区的多子(空穴)和 N 区的多子(自由电子)从 PN 结附近拉走，使 PN 结进一步加宽，PN 结的电阻增大，打破了 PN 结原来的平衡，在电场作用下的漂移运动大于扩散运动。这时通过 PN 结的电流，主要是少子形成的漂移电流，称为反向电流。由于在常温下，少数载流子的数量不多，故反向电流很小；而且当外加电压在一定范围内变化时，它几乎不随外加电压的变化而变化，因此反向电流又称为反向饱和电流。当反向电流可以忽略时，就可认为 PN 结处于截止状态。值得注意的是，由于本征激发随温度的升高而加剧，导致电

子—空穴对增多,因而反向电流将随温度的升高而成倍增长。反向电流是造成电路噪声的主要原因之一,因此,在设计电路时,必须考虑温度补偿问题。

综上所述,PN 结正偏时,正向电流较大,相当于 PN 结导通;反偏时,反向电流很小,相当于 PN 结截止。这就是 PN 结的单向导电性。

三、PN 结的击穿特性

当 PN 结上加的反向电压增大到一定数值时,反向电流突然剧增,这种现象称为 PN 结的反向击穿。PN 结出现击穿时的反向电压称为反向击穿电压,用 V_B 表示。反向击穿可分为雪崩击穿和齐纳击穿两类。

1. 雪崩击穿

当反向电压较高时,结内电场很强,使得在结内作漂移运动的少数载流子获得很大的动能。当它与结内原子发生直接碰撞时,将原子电离,产生新的“电子—空穴对”。这些新的“电子—空穴对”,又被强电场加速再去碰撞其它原子,产生更多的“电子—空穴对”。如此链锁反应,使结内载流子数目剧增,并在反向电压作用下作漂移运动,形成很大的反向电流。这种击穿称为雪崩击穿。显然雪崩击穿的物理本质是碰撞电离。

2. 齐纳击穿

齐纳击穿通常发生在掺杂浓度很高的 PN 结内。由于掺杂浓度很高,PN 结很窄,这样即使施加较小的反向电压(5V 以下),结层中的电场却很强(可达 $2.5 \times 10^5 \text{V/m}$ 左右)。在强电场作用下,会强行促使 PN 结内原子的价电子从共价键中拉出来,形成“电子—空穴对”,从而产生大量的载流子。它们在反向电压的作用下,形成很大的反向电流,出现了击穿。显然,齐纳击穿的物理本质是场致电离。

采取适当的掺杂工艺,将硅 PN 结的雪崩击穿电压可控制在 $8 \sim 1000 \text{V}$ 。而齐纳击穿电压低于 5V。在 $5 \sim 8 \text{V}$ 之间两种击穿可能同时发生。

§ 1.2 晶体二极管

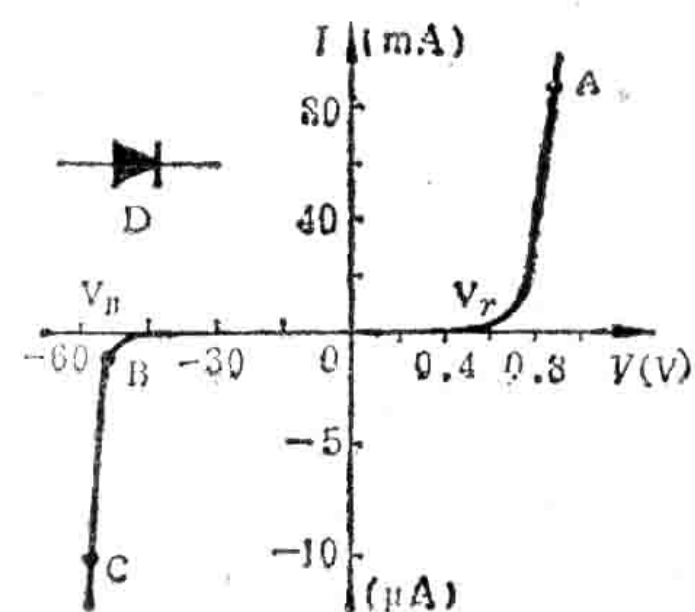
1.2.1 二极管的结构与伏安特性

晶体二极管也称半导体二极管,它是在 PN 结上加接触电极、引线 and 管壳封装而成的。按其结构,通常有点接触型和面结型两类。常用符号如图 1.2.1 中 D 来表示。

晶体二极管的伏安特性,表征流过二极管的电流 I 与二极管两极间所加电压 V 的关系。在 I - V 坐标系中,表示这种关系的曲线称为二极管的伏安特性曲线。它可以通过实验的方法测绘出来,也可直接用晶体管特性图示仪显示出来。典型的硅二极管伏安特性曲线如图 1.2.1 所示。

一、正向特性

由图可以看出,当所加的正向电压为零时,电流为零;当正向电压较小时,由于外电场远不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动所造成的阻力,故正向电流很小,二极管呈现出较大的电阻;当正向电压增加到某一数值 V_r 时,内电场被明显削



1.2.1 硅二极管的伏安特性

弱，二极管的电阻变得很小，电流开始显著增大，这个电压称为门限电压或开启电压，又称死区电压。当 $V > V_Y$ 以后，内电场进一步削弱，正向电流迅速增大。

在实际应用中，常把正向特性较直部分延长交于横轴的一点，定为门限电压 V_Y 值，它与管子的材料和环境温度有关，在常温下，硅管的 V_Y 约为 0.5 V 左右，锗管的 V_Y 约为 0.1 V 左右。

二、反向特性

给二极管加上反向电压以后，PN 结内电场进一步增强，使扩散更难进行。这时只有少数载流子在反向电压作用下的漂移运动，形成微弱的反向电流 I_R 。可以看出在一定电压范围内 I_R 不随反向电压的变化而变化，如图 1.2.1 中的 0-B 段所示。在常温下，小功率硅管的 I_R 小于 $0.1 \mu\text{A}$ ，锗管的 I_R 小于 0.1mA 。

三、反向击穿特性

当反向电压增到某一数值 V_B (反向击穿电压) 时，反向电流突然剧增，表明二极管被反向击穿，如图 1.2.1 中的 BC 段。其特点是，虽然反向电流剧增，但二极管的端电压却变化很小，这一特点成为制作稳压二极管的依据。

四、二极管伏安特性的函数表达式

理论证明，二极管的伏安特性可以用下面的函数式近似表示：

$$I = I_s (e^{qV/kT} - 1) = I_s (e^{V/V_T} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中 V 为加在二极管两端的电压， q 为电子电量 ($q = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)， k 为玻尔兹曼常数 ($k = 1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$)， T 为绝对温度 (K)，例如在室温为 27°C 时， $T = 273 + 27 = 300 \text{K}$ ； I_s 为反向饱和电流 (取决于温度和材料)， I 为通过二极管的电流， $V_T = kT/q$ 为温度的电压当量，在室温 (27°C) 下， $V_T = 26 \text{mV}$ 。

当正向电压 $V_F \gg V_T$ 时，式 (1.2.1) 可表示为 $I \approx I_s e^{V/V_T}$ ，即 I 与 V 成指数关系。

当反向电压 $|V_R| \gg V_T$ 时，式 (1.2.1) 可表示为 $I \approx -I_s$ ，即 I 不随 V 变化。

1.2.2 二极管的主要参数

二极管参数是用来表征二极管特性和应用范围的，它是使用、分析和设计二极管电路的依据。二极管的主要参数有：

1. 最大整流电流 I_{DM}

I_{DM} 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。它由 PN 结的面积、材料和散热条件决定。若工作电流超过 I_{DM} ，可能导致结温过高而烧毁 PN 结。

2. 最高反向工作电压 V_{RM}

V_{RM} 是指二极管在反向工作状态下安全使用时的最高反向电压。通常 V_{RM} 的值规定为反向击穿电压 V_B 的一半。

3. 反向电流 I_R

I_R 是指二极管未被击穿时的反向电流。 I_R 越小，二极管单向导电性越好。

4. 直流电阻 R_D

R_D 是指二极管两端所加的直流电压 V 与流过它的直流电流 I 之比，即

$$R_D = V/I \quad (1.2.2)$$