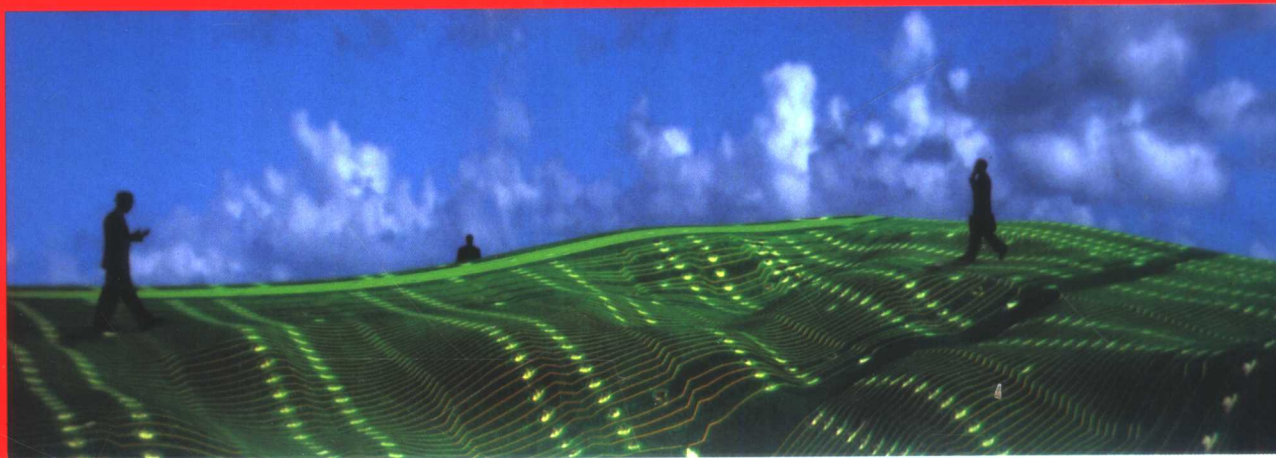


21 世纪高等学校
规 划 教 材



电子技术基础

吴利斌 主编 郭永 闫大建 副主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

21 世纪高等学校规划教材

电子技术基础

吴利斌 主编

郭永 闫大建 副主编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础/吴利斌主编. —北京:国防工业出版社,
2007. 3

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-118-05020-2

I. 电… II. 吴… III. 电子技术—高等学校—教材
IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021505 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 382 千字

2007 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

“电子技术”是非电类专业的技术基础课程。通过本课程的学习,应使学生得到电子技术必要的基础理论、基本知识和基本技能,了解电子技术发展的状况,为学习后续课程、从事有关的工程技术和科学研究工作打好理论和实践基础。为适应电子技术与信息技术的不断发展和教育教学改革的需要,本书加强了电子技术基础内容;在保证学生掌握基本概念、基本原理和基本分析方法的前提下,适当减少分立元件的单元电路,重点加强线性集成电路和数字集成电路部分的内容,如常用的模拟集成电路、运算电路、集成功率放大电路、集成三端稳压器,以及数字电路中常用的集成门电路、加法器、编码器、译码器、集成计数器等。

本书的第1章、第3章和第4章由李奋荣编写;第2章和第6章由张巍编写;第5章由郭文义编写;第7章、第8章和第14章由郭永编写;第9章~第11章由吴利斌编写;第12章和第13章由闫大建编写。全书最后由吴利斌统稿。在编写过程中,得到了学院领导的指导与帮助,同时也得到了电气化教研室全体教师的帮助。他们提出了许多宝贵的修改意见和建议,在此对他们表示衷心的感谢。

限于编者的水平有限,书中难免有错误和不妥之处。希望参考和使用本书的师生批评指正,以便修正提高。

作者

目 录

第 1 章 半导体二极管及其基本电路	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体材料	1
1.1.2 半导体的共价键结构	1
1.1.3 本征半导体、空穴及其导电作用	1
1.1.4 杂质半导体	3
1.1.5 PN 结的形成	4
1.1.6 PN 结的单向导电性	5
1.2 半导体二极管及其基本特性	6
1.2.1 半导体二极管	6
1.2.2 二极管的伏安特性	6
1.2.3 二极管的主要参数	7
1.3 特殊二极管	8
1.3.1 稳压管	8
1.3.2 光电二极管	9
1.3.3 发光二极管	10
1.4 二极管的基本应用电路	10
1.4.1 开关电路	10
1.4.2 光—电转换与电—光转换电路	11
1.5 二极管整流及滤波电路	11
1.5.1 单相整流电路	12
1.5.2 滤波电路	14
1.5.3 稳压管稳压电路	17
习题	18
第 2 章 三极管及其基本放大电路	21
2.1 半导体三极管	21
2.1.1 三极管的基本结构类型与符号	21
2.1.2 三极管的电流分配关系和放大作用	22
2.1.3 三极管的特性曲线	22
2.1.4 晶体管的主要参数	25
2.2 放大电路的基本组成	27
2.3 共射基本放大电路	28

2.3.1	共发射极放大电路的组成	28
2.3.2	放大电路中各点电压、电流及其表示	28
2.3.3	静态分析	29
2.3.4	动态分析	30
2.4	工作点稳定的电路	38
2.4.1	温度对工作点的影响	38
2.4.2	分压式偏置电路	39
2.5	射极输出器	43
2.5.1	静态分析	43
2.5.2	动态分析	43
2.6	多级放大电路	45
2.6.1	阻容耦合放大电路	46
2.6.2	直接耦合放大电路	48
2.6.3	变压器耦合	49
	习题	50
第3章	场效应管及其基本放大电路	54
3.1	绝缘栅型场效应管	54
3.1.1	N沟道增强 MOS 型管	54
3.1.2	N沟道耗尽型 MOS 管	56
3.1.3	场效应管主要参数	56
3.2	场效应管放大电路	59
3.2.1	共源极放大电路	59
3.2.2	共漏极放大电路——源极输出器	61
	习题	61
第4章	功率放大器	63
4.1	功率放大电路的一般问题	63
4.1.1	功率放大电路的特点及主要研究对象	63
4.1.2	功率放大器的分类	64
4.2	互补对称的功率放大器	64
4.2.1	乙类互补对称的功率放大器(OCL)	65
4.2.2	单电源互补对称电路(OTL)	68
4.2.3	采用复合管的准互补对称电路	68
4.3	集成功率放大器	69
	习题	71
第5章	集成运算放大器及其应用	72
5.1	集成电路与集成运算放大器简介	72
5.1.1	集成电路的分类	72
5.1.2	集成电路中元器件的特点	73
5.1.3	集成电路的封装形式	73

5.1.4	集成运算放大器及其基本组成	73
5.2	差动放大电路	74
5.2.1	差动放大电路的工作情况	74
5.2.2	差动放大器的差模放大倍数	76
5.2.3	差动放大器的共模放大倍数和共模抑制比	76
5.2.4	差动放大器的输入—输出方式	77
5.3	集成运算放大器内部电路简介	78
5.3.1	集成运算放大器的基本单元电路	79
5.3.2	$\mu\text{A}741$ 双极型集成运算放大器	83
5.3.3	专用型集成运算放大器	85
5.4	集成运算放大器的主要参数	86
5.5	理想集成运算放大器及符号	88
5.5.1	集成运放的符号	88
5.5.2	集成运放的电压传输特性	88
5.5.3	集成运放的理想化模型	89
5.6	反馈在集成运放中的应用	90
5.6.1	反馈的基本概念	90
5.6.2	反馈的判断	91
5.6.3	四种反馈组态	92
5.6.4	负反馈放大电路的一般表达式	96
5.7	频率特性的基本概念	96
5.7.1	基本概念	97
5.7.2	对数频率特性	98
5.7.3	集成运放的频率特性	98
5.8	集成运放的线性应用	98
5.8.1	比例运算电路	98
5.8.2	加法运算电路	100
5.8.3	减法运算电路	100
5.8.4	积分运算电路	100
5.8.5	微分运算电路	101
5.9	集成运放的非线性应用	101
5.9.1	比较器	101
5.9.2	方波发生器	103
5.10	正弦波发生器	104
5.10.1	正弦振荡的一般问题	105
5.10.2	文氏电桥振荡器	106
	习题	107
第6章	直流稳压电源	111
6.1	串联型稳压电源	111

6.1.1	稳压电源的主要指标	111
6.1.2	串联反馈式稳压电路的工作原理	112
6.1.3	简单分立元件组成的稳压电路	113
6.2	集成稳压电源	113
6.2.1	三端固定集成稳压电路	113
6.2.2	典型应用电路	114
6.2.3	三端可调输出电压集成稳压器	114
6.2.4	低压差三端稳压器	114
6.3	串联开关式稳压电源	115
	习题	118
第7章	数字逻辑基础	120
7.1	数字电路的基本概念	120
7.1.1	模拟信号和数字信号	120
7.1.2	正逻辑与负逻辑	120
7.1.3	数字信号的主要参数	121
7.1.4	数字电路	121
7.2	数制与编码	122
7.2.1	数制	122
7.2.2	数制转换	122
7.2.3	编码	124
7.3	逻辑函数	126
7.3.1	逻辑变量与逻辑函数	126
7.3.2	基本逻辑运算	126
7.3.3	常用复合逻辑运算	127
7.3.4	逻辑函数的建立及其表示方法	128
	习题	130
第8章	逻辑门电路	132
8.1	基本逻辑门电路	132
8.1.1	二极管与门和或门电路	132
8.1.2	三极管非门电路	133
8.1.3	DTL与非门电路	134
8.2	TTL逻辑门电路	135
8.2.1	TTL与非门的基本结构及工作原理	135
8.2.2	TTL与非门的开关速度	136
8.2.3	TTL与非门的电压传输特性及抗干扰能力	137
8.2.4	TTL与非门的带负载能力	139
8.2.5	TTL与非门举例—7400	140
8.2.6	TTL门电路的其他类型	141
8.3	MOS逻辑门电路	144

8.3.1	CMOS 非门	144
8.3.2	其他的 CMOS 门电路	145
8.4	集成逻辑门电路的应用	147
8.4.1	TTL 与 CMOS 器件之间的接口问题	147
8.4.2	TTL 和 CMOS 电路带负载时的接口问题	147
8.4.3	多余输入端的处理	148
习题		148
第 9 章	组合逻辑电路的分析与设计	151
9.1	逻辑代数	151
9.1.1	逻辑代数的基本公式	151
9.1.2	逻辑代数的基本规则	152
9.1.3	逻辑函数的代数化简法	153
9.2	逻辑函数的卡诺图化简法	154
9.2.1	最小项的定义与性质	154
9.2.2	逻辑函数的最小项表达式	155
9.2.3	卡诺图	156
9.2.4	用卡诺图表示逻辑函数	157
9.2.5	逻辑函数的卡诺图化简法	158
9.2.6	具有无关项的逻辑函数的化简	159
9.3	组合逻辑电路的分析方法	161
9.3.1	组合逻辑电路的特点	161
9.3.2	组合逻辑电路的分析方法	161
9.4	组合逻辑电路的设计方法	162
9.5	组合逻辑电路中的竞争冒险	163
9.5.1	产生竞争冒险的原因	163
9.5.2	冒险现象的识别	164
9.5.3	冒险现象的消除方法	165
习题		165
第 10 章	组合逻辑模块及其应用	169
10.1	编码器	169
10.1.1	编码器的基本概念及工作原理	169
10.1.2	优先编码器	170
10.1.3	编码器的应用	171
10.2	译码器	172
10.2.1	译码器的基本概念及工作原理	172
10.2.2	集成译码器	172
10.2.3	译码器的应用	173
10.3	数据选择器	175
10.3.1	数据选择器的基本概念及工作原理	175

10.3.2	集成数据选择器	176
10.3.3	数据选择器的应用	176
10.4	数值比较器	178
10.4.1	数值比较器的基本概念及工作原理	178
10.4.2	集成数值比较器及其应用	179
10.5	加法器	181
10.5.1	加法器的基本概念及工作原理	181
10.5.2	多位数加法器	182
10.5.3	集成加法器的应用	182
10.6	半导体存储器	183
10.6.1	随机存取存储器(RAM)	183
10.6.2	只读存储器(ROM)	186
	习题	191
第 11 章	触发器	194
11.1	基本触发器	194
11.1.1	基本 RS 触发器	194
11.1.2	同步 RS 触发器	195
11.2	主从触发器	197
11.2.1	主从 RS 触发器	197
11.2.2	主从 JK 触发器	198
11.3	边沿触发器	200
11.3.1	维持—阻塞边沿 D 触发器	200
11.3.2	CMOS 主从结构的边沿触发器	201
11.4	触发器功能的转换	202
11.4.1	用 JK 触发器转换成其他功能的触发器	203
11.4.2	用 D 触发器转换成其他功能的触发器	203
	习题	204
第 12 章	时序逻辑电路	208
12.1	时序逻辑电路的基本概念	208
12.1.1	时序逻辑电路的结构及特点	208
12.1.2	时序逻辑电路的分类	208
12.2	基于触发器时序电路的分析	209
12.2.1	分析方法	209
12.2.2	同步时序电路的分析	210
12.2.3	异步时序逻辑电路的分析举例	211
12.3	计数器	212
12.3.1	二进制计数器	212
12.3.2	非二进制计数器	219
12.3.3	集成计数器的应用	223

12.4 数码寄存器与移位寄存器	226
12.4.1 数码寄存器	226
12.4.2 移位寄存器	227
12.4.3 集成移位寄存器 74194	229
12.4.4 移位寄存器构成的移位型计数器	229
习题	230
第 13 章 脉冲波形的产生与整形	235
13.1 集成 555 定时器	235
13.1.1 555 定时器的电路结构与工作原理	235
13.1.2 555 定时器的功能表(见表 13.1.1)	236
13.2 施密特触发器	237
13.2.1 用 555 定时器构成的施密特触发器	237
13.2.2 施密特触发器的应用举例	238
13.3 多谐振荡器	238
13.3.1 用 555 定时器构成的多谐振荡器	239
13.3.2 占空比可调的多谐振荡器电路	240
13.3.3 石英晶体多谐振荡器	240
13.4 单稳态触发器	241
13.4.1 由 555 定时器构成的单稳态触发器	242
13.4.2 单稳态触发器的应用	243
习题	244
第 14 章 数模与模数转换电路	246
14.1 D/A 转换器	246
14.1.1 D/A 转换器的基本原理	246
14.1.2 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	246
14.1.3 权电流型 D/A 转换器	248
14.1.4 D/A 转换器的主要技术指标	248
14.2 A/D 转换器	249
14.2.1 A/D 转换的一般步骤和取样定理	249
14.2.2 A/D 转换器	251
14.2.3 A/D 转换器的主要技术指标	255
习题	256
参考文献	257

第 1 章 半导体二极管及其基本电路

半导体二极管是由一个 PN 结构成的半导体器件,在电子电路有广泛的应用。本章在简要地介绍半导体的基本知识后,主要讨论了半导体器件的核心环节——PN 结。在此基础上,还将介绍半导体二极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数、二极管基本电路及其分析方法与应用。最后对二极管稳压电路也给予了系统介绍。

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体材料

半导体器件是由导电性能介于导体和绝缘体之间的半导体材料制造而成的。常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等;以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中硅和锗是目前最常用的半导体材料。

1.1.2 半导体的共价键结构

硅和锗的简化原子结构模型如图 1.1.1 所示。这是因为硅和锗都是 4 价元素,它们原子的最外层电子都是 4 个,称为价电子。由于原子呈中性,故原子核用带圆圈的+4 符号表示。价电子受原子核的束缚力最小,物质的化学性质是由价电子决定的,半导体的导电性能也与价电子密切相关。

制造半导体器件的材料都要制成晶体结构,晶体硅或晶体锗是由硅或锗原子按一定的规则整齐地排列(称为空间点阵)而成的。硅或锗制成晶体后,由于晶体中原子之间距离很近,价电子不仅受到原来所属原子核而且还受到相邻原子核的吸引,即一个价电子为相邻的两个原子核所共有。这样,相邻原子之间通过共有价电子的形成而结合起来,即形成“共价键”结构。因此,每个硅或锗的原子都以对称的形式和其邻近的 4 个原子通过共价键紧密地联系起来,如图 1.1.2 所示,图中两条虚线表示原子间的共价键。该图表示的是二维结构,实际结构应是三维的。

1.1.3 本征半导体、空穴及其导电作用

1. 本征半导体

完全纯净的半导体叫本征半导体。其导电能力与所含电荷载流子(即可移动的带电粒子,如自由电子等)的浓度有关,浓度愈高,其导电能力愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素,包括材料的基本性质、温度值以及杂质的存在。在绝对温度为零度($T = 0\text{K}$,

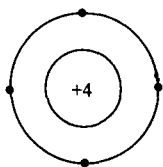


图 1.1.1 硅或锗的简化原子结构模型

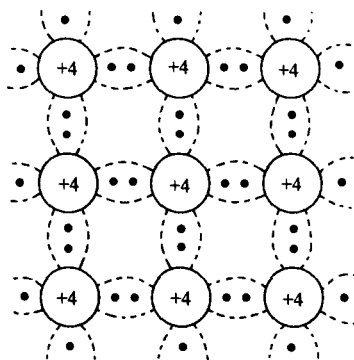


图 1.1.2 硅或锗晶体的共价键结构示意图

相当于 -273.15°C) 时, 价电子不能挣脱共价键的束缚, 也就不能自由移动。这样, 本征半导体中虽有大量的价电子, 但没有自由电子, 此时半导体是不导电的。但是, 半导体的共价键实际上是一种“松散联合”, 其中的价电子并不像在绝缘体中被束缚得很紧。当温度升高或受光照射时, 价电子以热运动的形式不断从外界获得一定的能量, 少数价电子因获得的能量较大从而挣脱共价键的束缚, 成为自由电子, 如图 1.1.3 (B 处) 所示, 这种现象称为本征激发。

2. 空穴

当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后, 就同时在原来共价键的相应位置上留下一个空位, 这个空位称为空穴, 如图 1.1.3 所示。其中 A 处为空穴, B 处为自由电子。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。显然, 自由电子和空穴是成对出现的, 所以称它们为电子空穴对。

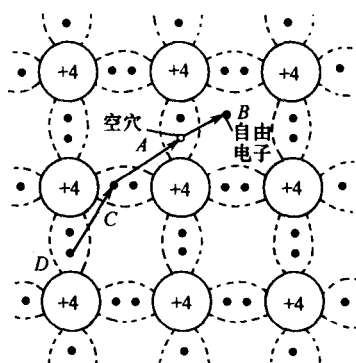


图 1.1.3 本征激发现象

3. 两种载流子

本征激发产生的自由电子, 将在电场作用下定向运动形成电流, 称为电子载流子。

由于共价键中出现了空穴, 在外加电场或其他能源的作用下, 邻近价电子就可填补到这个空位中来, 而该价电子原来所在的位置上又留下新的一个空位, 以后其他电子有可能转移到这个新的空位。这样就在共价键中出现了一定的电荷迁移。

见图 1.1.3, 设外加电场 E 的方向为从右至左, 若 A 处出现一个空位, C 处电子就可填补到这个空位中来, 从而使空穴由 A 处移到 C 处; 同样, 邻近的 D 处的电子又可以填补 C 处的空穴, 空穴又从 C 处移到 D 处。在这个过程中, 价电子由 D 处到 C 处再到 A 处, 虽然可以移动, 但仍处于束缚状态。价电子填补空穴的运动, 可以等效为带正电荷的空穴在与价电子运动相反的方向运动。为了区别于自由电子的运动, 通常把这种价电子的填补运动称为空穴运动, 认为空穴是一种带正电荷的载流子, 它所带电量与电子相等, 符号相反。在电场作用下, 并非所有的价电子都参与导电, 而只是少量价电子在共价键中依次做填补运动才起导电作用。

可见, 在本半导体中存在两种载流子: 带负电荷的电子载流子和带正电荷的空穴载流子。

在本征激发产生电子空穴对的同时,自由电子在运动中有可能和空穴相遇,重新被共价键束缚起来,电子空穴对消失,这种现象称为“复合”。显然,激发和复合是矛盾着的双方。在一定的温度下,激发和复合虽然都在不停地进行,但最终将处于动态平衡状态,这时半导体中的载流子浓度保持在某一定值。由于本征激发产生的电子空穴对的数目很少,载流子浓度很低,因此,本征半导体的导电能力很弱。

1.1.4 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质,就会使半导体的导电性能发生显著的改变。根据掺入杂质的化合价不同,杂质半导体分为 N 型和 P 型两大类。

1. N 型半导体

在 4 价元素的硅(或锗)晶体中,掺入微量的 5 价元素磷(或砷、锑等)后,磷原子有 5 个价电子,它以 4 个价电子与周围的硅原子组成共价键,多余的一个价电子处于共价键之外。由于这个价电子不受共价键的束缚,因此使杂质磷的原子变成带正电荷的离子,如图 1.1.4(a) 所示。由于这种杂质原子可以提供电子,故称为施主杂质。施主原子的数目虽然不多,但在室温下每掺入一个施主原子,都能产生一个自由电子和一个正离子,自由电子将为杂质半导体的导电做贡献。显然,掺入的杂质越多,杂质半导体的导电性能越好。

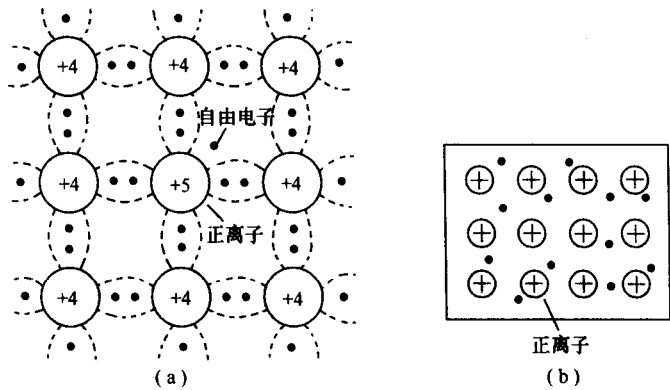


图 1.1.4 N 型半导体
(a) 结构示意图; (b) 离子和载流子(不计本征激发)。

通常,掺杂所产生的自由电子浓度远大于本征激发所产生的自由电子或空穴的浓度,所以杂质半导体的导电性能远超过本征半导体。显然,这种半导体中自由电子浓度远大于空穴浓度,所以称电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(称为少子)。这种半导体的导电主要依靠电子,称为 N 型半导体。

不难理解,N 型半导体总体上仍为电中性,其多子(电子) 的浓度取决于所掺杂质的浓度,少子(空穴) 是由本征激发产生的,故它的浓度与温度或光照密切相关。为了突出 N 型半导体的主要特征,可以把 N 型半导体画成图 1.1.4(b) 所示形式。

2. P 型半导体

在硅(或锗)的晶体中掺入微量的 3 价元素硼(或铝、镓等)后,由于硼原子只有 3 个价电子,它与周围的硅原子组成共价键时,因缺少一个电子而产生一个空位,在室温下它很容易吸引邻近硅原子的价电子来填补,于是杂质原子变为带负电荷的离子,而邻近硅原子

的共价键因缺少一个电子,出现了一个空穴,如图 1.1.5(a) 所示。由于这种杂质原子能吸收电子,故称为受主杂质。受主负离子也不能移动,不参与导电,只有空穴才对杂质半导体的导电做贡献。同样,掺入的杂质越多,这种杂质半导体的导电性能越好。

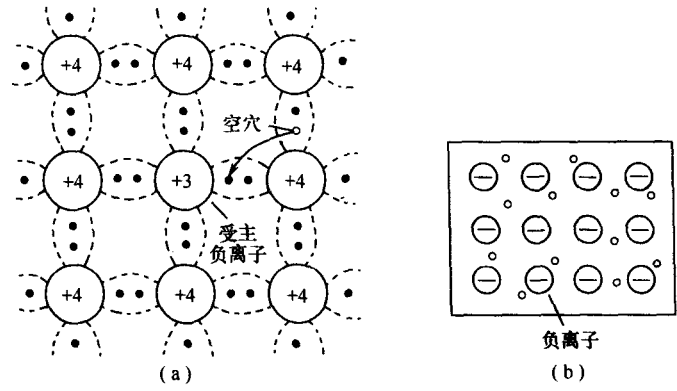


图 1.1.5 P 型半导体
(a) 结构示意图; (b) 离子和载流子(不计本征激发)。

在室温下,每掺入一个受主原子,都能产生一个空穴和一个负离子。在这种半导体中,空穴是多子,自由电子是少子,它的导电主要依靠空穴,称为P型半导体。与N型半导体相似,P型半导体总体上也是电中性的,其多子(空穴)的浓度取决于所掺杂质的浓度,少子(电子)的浓度与温度或光照密切相关。为了突出P型半导体的主要特征,可以把P型半导体画成图 1.1.5(b) 所示形式。

1.1.5 PN 结的形成

若在一块本征半导体上,两边掺入不同的杂质,使一边成为 P 型半导体,另一边成为 N 型半导体,则在两种半导体的交界面附近形成一层很薄的特殊导电层称为 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

当 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时,由于交界面两侧载流子的浓度差别,N 区的电子必然向 P 区扩散,P 区的空穴也要向 N 区扩散,这种由于浓度差产生的自然扩散力所引起的运动称为扩散运动。显然,扩散运动实际是多子的运动。扩散到 P 区的电子将与 P 区的多子空穴复合而消失,扩散到 N 区的空穴将与 N 区的多子电子复合而消失。于是在交界面附近,N 区的一侧出

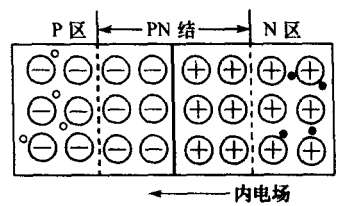


图 1.1.6 PN 结的形成

现不能移动的杂质正离子区,P 区的一侧出现不能移动的杂质负离子区,这些不能移动的带电离子称为空间电荷,而交界面两侧的正、负离子组成的区域称为空间电荷区,这就是 PN 结,如图 1.1.6 所示。由于空间电荷区内缺少载流子,或者说载流子几乎耗尽了,因此空间电荷区又称为耗尽层。

空间电荷区产生的同时,一个由 N 区指向 P 区的电场也产生了,这个电场不是外加的,而是空间电荷区内部电荷产生的,故称为内电场。内电场一方面阻止多子的扩散,另一方面却促使少子在电场力的作用下产生与扩散运动方向相反的运动,称为漂移运动。显

然,漂移运动实际上是少子的运动(N区空穴向P区漂移,P区电子向N区漂移)。其中,扩散使电子由N区向P区移动、空穴由P区向N区移动,而漂移的作用恰好相反。随着扩散的进行,空间电荷区加宽,内电场增强,这反过来削弱了扩散运动,增强了漂移运动,于是空间电荷区又会变窄,内电场减弱。可以想象,当扩散运动进行到一定程度时,同一时间内扩散到空间电荷区的载流子数量和漂移回去的载流子数量相等,二者处于动态平衡状态,空间电荷区的宽度不再变化(其宽度很薄,仅数微米)。

1.1.6 PN结的单向导电性

若在PN结两端接上外加电源,载流子的运动情况就要发生变化,动态平衡遭到破坏。外电源有两种接法:一种是PN结的P区接电源正极,N区接电源负极,称为正向接法或正向偏置,简称正偏;另一种是PN结的P区接电源负极,N区接电源正极,称为反向接法或反向偏置,简称反偏。它们分别如图1.1.7所示。

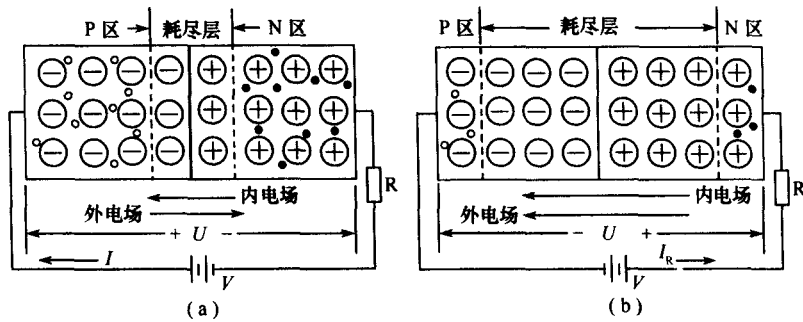


图 1.1.7 外加电压时的 PN 结
(a) 正偏; (b) 反偏。

1. 正向导通

正偏时,外加电场与内电场的方向相反,因此削弱了内电场,PN结的原有平衡状态被打破。在外加电场作用下,多子(P区的空穴、N区的电子)被推向耗尽层,分别中和了耗尽层中一部分的负、正离子,使空间电荷减少,耗尽层变窄,即内电场被削弱,如图1.1.7(a)所示,这就有利于多子的扩散而不利少子的漂移。因此,多子源源不断越过PN结形成较大的电流,少子的漂移电流很小,PN结中的电流 I 主要是扩散电流,其方向是从P区到N区,通常把正偏时PN结流过的电流称为正向电流。由于正向电流较大,则PN结对外电路呈现较小的电阻,这种状态称为PN结的导通。

2. 反向截止

反偏时,外加电场与内电场方向一致,在外加电场的作用下,多子(P区的空穴、N区的电子)都背离耗尽层运动,使空间电荷增多,耗尽层变宽,即内电场增强了,如图1.1.7(b)所示,这就阻止了多子的扩散,却有利于少子的漂移。由于扩散很难进行,因此PN结中的电流主要是漂移电流。考虑到少子的浓度很低,故漂移电流很小,即PN结中的电流很小,其方向是从N区到P区(外电路上则是流入N区),通常把反偏时PN结流过的电流称为反向电流,用 I_{sat} 表示。由于反向电流很小,则PN结对外电路呈现很大的电阻,称为反向电阻。此时PN结基本上是不导电的,这种状态称为PN结的截止。

总之,正偏时PN结导通,有较大的正向电流流过,呈现较小的正向电阻;反偏时PN

结截止,仅有微小的反向饱和电流流过,几乎不导电,呈现很大的反向电阻。这就是 PN 结的单向导电性。

1.2 半导体二极管及其基本特性

1.2.1 半导体二极管

半导体二极管就是由一个 PN 结加上相应的电极引线及管壳封装而成的。由 P 区引出的电极称为阳极,用 a 表示;N 区引出的电极称为阴极,用 k 表示。因为 PN 结的单向导电性,二极管导通时电流方向是由阳极通过管子内部流向阴极。二极管的种类很多,按材料来分,最常用的有硅管和锗管两种;按结构来分,有点接触型、面接触型和硅平面型几种;按用途来分,有普通二极管、整流二极管、稳压二极管等多种。

图 1.2.1 是常用二极管的符号、结构及外形的示意图。二极管的符号如图 1.2.1(a) 所示。箭头表示正向电流的方向。一般在二极管的管壳表面标有符号或色点、色圈来表示二极管的极性,左边实心箭头的符号是工程上常用的符号,右边的符号为新规定的符号。

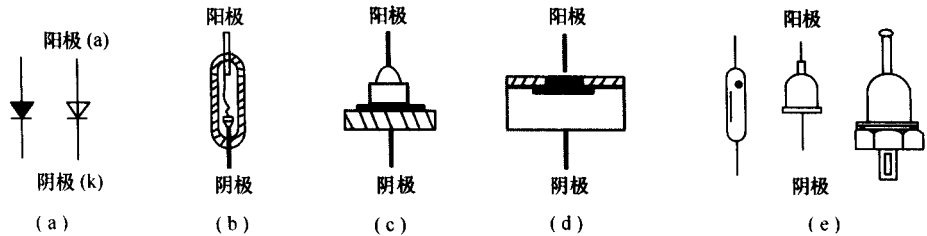


图 1.2.1 常用二极管的符号、结构和外形示意图

(a) 符号; (b) 点接触型; (c) 面接触型; (d) 硅平面型; (e) 外形示意图。

从工艺结构来看,点接触型二极管(一般为锗管)如图 1.2.1(b) 所示,其特点是结面积小,因此结电容小,允许通过的电流也小,适用高频电路的检波或小电流的整流,也可用做数字电路里的开关元件;面接触型二极管(一般为硅管)如图 1.2.1(c) 所示,其特点是结面积大,结电容大,允许通过的电流较大,适用于低频整流;硅平面型二极管如图 1.2.1(d) 所示,结面积大的可用于大功率整流,结面积小的,适用于脉冲数字电路作开关管;图 1.2.2(e) 为常见点接触型、面接触型和硅平面型二极管的外形示意图。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的电流与电压的关系曲线 $I = f(U)$,称为二极管的伏安特性。其伏安特性曲线如图 1.2.2 所示。二极管的核心是一个 PN 结,具有单向导电性,其实际伏安特性与理论伏安特性略有区别。

二极管的伏安特性方程可近似用 PN 结的伏安特性方程来表示。理论研究表明,PN 结两端电压 U 与流过 PN 结的电流 I 之间的关系为

$$I = I_{\text{sat}} (e^{U/U_T} - 1) \quad (1.2.1)$$