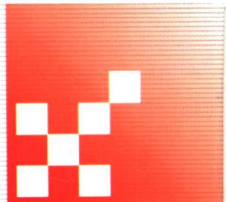




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电工学 (中册)

电子技术

● 哈尔滨工业大学电工学教研室 杨世彦 主编

第2版



免费
电子课件

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TM1

TM1/95=2

:2

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电 工 学

中 册

电 子 技 术

第 2 版

哈尔滨工业大学电工学教研室

杨世彦 主编

毕淑娥 席志红 主审

机 械 工 业 出 版 社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是面向机电类学科的多学时电工学系列教材（共三册）中的一册。

全书共分10章，内容包括：常用半导体元器件、基本放大电路、集成运算放大器、组合逻辑电路、时序逻辑电路、可编程逻辑器件、模拟量和数字量的转换、信号的发生与变换、电力电子技术基础、电子电路的Pspice仿真分析等。

本书内容全面，注重实际应用，适当增加了一些新技术内容，并力求深入浅出，便于阅读，可以作为其他非电类工科专业电工学的参考教材和有关工程科技人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电工学. 中册, 电子技术/杨世彦主编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2008.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-12395-8

I. 电... II. 杨... III. ①电工学—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第038598号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张静 责任印制: 杨曦

北京机工印刷厂印刷

2008年4月第2版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·502千字

标准书号: ISBN 978-7-111-12395-8

定价: 35.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

电工学课程是机电类学科本科学生的一门重要的技术基础课，其目的是培养学生掌握和运用电工技术、电子技术和现代电气传动及其控制技术的基本理论、基本知识和基本技能。要求学生在学完本课程后，具备一定的分析和处理与电工、电子和电气传动及其控制等相关技术的实际能力，了解这些技术的最新发展和应用情况。

为满足机电类学科人才培养需要，2003 年哈尔滨工业大学电工学教研室在原校内使用教材的基础上，编写了一套面向“机械设计制造及其自动化”专业以及其他相关专业的一套多学时电工学教材。这套教材分为三册，即：《电工技术》、《电子技术》和《现代传动及其控制技术》。每一册的内容自成体系，可以作为其他学科电工学的参考教材和有关工程科技人员的参考书。

本书为这套电工学教材的中册，即《电子技术》。全书内容注重基础性、系统性、实用性和先进性，在压缩分立元件电子电路内容、增加集成电路内容的同时，突出电子元器件，尤其是集成电路的外部特性及其在系统中的应用方面的内容，并将应用日益广泛的可编程逻辑器件、全控型电力电子器件、电能开关变换技术、电子电路仿真技术等较新的内容介绍给读者，使教材内容尽可能跟上时代发展的步伐。

电子技术是电工学内容中最活跃且发展最迅速的部分，同时也是电工技术应用最直接的部分。随着电工学课程教学内容和体系改革的不断深入，为了更好地适应“十一五”期间机电类学科教学计划的修订，根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会电工学课程指导小组最新修订的“电工学教学基本要求”，在第 1 版基础上，对教材内容进行如下调整和充实：

1. 进一步压缩了分立元件基本放大电路的内容。

2. 精简了“数字电路的基础知识”一章的内容，并作为一节合并到“组合逻辑电路”一章。

3. 删去了“电子设计自动化技术”一章的部分内容, 针对电子电路的特点, 改为例题形式的“电子电路的 Pspice 仿真分析”, 加强了各章内容之间的联系。

4. 加强了现代电力电子技术的应用, 在“电力电子技术基础”一章增加了交流调压和稳压等交流开关变换内容。

5. 全书增加了与电路图或符号相对应的电子元器件的实物图片。

书中打*号的章节是供选用的内容。

本书第1、7章由刘晓芳编写, 第2章由杨世彦编写, 第3、4章由邹继明编写, 第5章由贲洪奇编写, 第6、10章由杨威编写, 第9章由韩基业编写, 第8章及全部附录由郑雪梅编写。全书由杨世彦统稿, 由华南理工大学毕淑娥和哈尔滨工程大学席志红教授审阅。

由于编者水平有限, 书中难免有错误和不妥之处, 敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 常用半导体元器件	1
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 本征半导体及其导电机理	2
1.1.3 N 型半导体和 P 型半导体	3
练习与思考	3
1.2 PN 结及其单向导电性	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	4
练习与思考	5
1.3 半导体二极管	5
1.3.1 二极管的基本结构	5
1.3.2 二极管的伏安特性	6
1.3.3 二极管的主要参数	8
1.3.4 稳压二极管	8
1.3.5 二极管的应用	9
练习与思考	10
1.4 双极型晶体管	10
1.4.1 双极型晶体管的结构	11
1.4.2 双极型晶体管的电流放大作用	12
1.4.3 双极型晶体管的特性曲线	12
1.4.4 双极型晶体管的主要参数	14
1.4.5 双极型晶体管简化的小信号模型	15
练习与思考	16
1.5 绝缘栅型场效应晶体管	16
1.5.1 基本结构和工作原理	16
1.5.2 绝缘栅型场效应晶体管的特性曲线	18

1.5.3 绝缘栅型场效应晶体管的主要参数	19
1.5.4 绝缘栅型场效应晶体管简化的的小信号模型	20
练习与思考	20
1.6 半导体光电器件	20
1.6.1 发光二极管	21
1.6.2 光电二极管	22
1.6.3 双极型光电晶体管	23
1.6.4 光电耦合器	23
练习与思考	24
本章习题	24
第2章 基本放大电路	27
2.1 共射极放大电路	27
2.1.1 共射极放大电路的组成	27
2.1.2 共射极放大电路的工作原理	28
2.1.3 共射极放大电路的静态分析	31
2.1.4 共射极放大电路的动态分析	34
练习与思考	38
2.2 共集电极放大电路	38
2.2.1 共集电极放大电路的静态分析	38
2.2.2 共集电极放大电路的动态分析	39
练习与思考	41
2.3 场效应晶体管共源极放大电路	41
2.3.1 共源极放大电路的静态分析	41
2.3.2 共源极放大电路的动态分析	42
练习与思考	44
2.4 多级放大与放大电路的频率响应	44
2.4.1 多级放大电路的耦合方式	44
2.4.2 多级放大电路的分析	46
2.4.3 阻容耦合放大电路的频率响应	48
练习与思考	51
2.5 放大电路中的负反馈	51
2.5.1 反馈的概念	52
2.5.2 负反馈的类型及其判断	52
2.5.3 负反馈对放大电路性能的影响	56
练习与思考	59
2.6 差分放大电路	60
2.6.1 差分放大电路的工作原理	60
2.6.2 差分放大电路的输入和输出方式	62
练习与思考	63
2.7 功率放大电路	63
2.7.1 功率放大电路的功能和特点	63
2.7.2 互补对称功率放大电路	64

2.7.3 集成功率放大电路	68
练习与思考	69
本章习题	69
第3章 集成运算放大器	75
3.1 集成运算放大器概述	75
3.1.1 集成运算放大器的电路组成	75
3.1.2 集成运算放大器的电压传输特性	76
3.1.3 集成运算放大器的主要性能参数	76
3.1.4 理想运算放大器	77
练习与思考	78
3.2 集成运放在信号运算方面的应用	78
3.2.1 比例运算电路	79
3.2.2 加法运算电路	81
3.2.3 减法运算电路	82
3.2.4 积分运算电路	84
3.2.5 微分运算电路	85
3.2.6 对数运算和指数运算电路	86
3.2.7 乘法和除法运算电路	87
练习与思考	88
3.3 集成运放在信号处理方面的应用	89
3.3.1 有源滤波器	89
3.3.2 电压比较电路	91
3.4 集成运放的选择和使用	94
本章习题	95
第4章 组合逻辑电路	99
4.1 逻辑代数的基本知识	99
4.1.1 数制和码制	99
4.1.2 逻辑变量和逻辑函数	101
4.1.3 逻辑代数中的基本运算和复合运算	102
4.1.4 逻辑代数的基本公式和基本定理	105
4.1.5 逻辑函数的表示方法	106
4.1.6 逻辑函数的化简方法	109
练习与思考	115
4.2 集成门电路	115
4.2.1 TTL 反相器	115
4.2.2 TTL 与非门	117
4.2.3 TTL 集电极开路门电路	118
4.2.4 TTL 三态输出门电路	119
4.2.5 CMOS 数字集成电路简介	120
4.2.6 TTL 电路与 CMOS 电路接口	120
练习与思考	121

4.3 组合逻辑电路的分析和设计方法	122
4.3.1 组合逻辑电路的分析方法	122
4.3.2 组合逻辑电路的设计方法	123
练习与思考	124
4.4 加法器	124
4.4.1 一位加法器	124
4.4.2 多位加法器	126
练习与思考	127
4.5 编码器	127
4.5.1 普通编码器	127
4.5.2 优先编码器	128
练习与思考	130
4.6 译码器	130
4.6.1 二进制译码器	130
4.6.2 二十进制译码器	132
4.6.3 七段显示译码器	133
练习与思考	135
4.7 数据选择器和数据分配器	135
4.7.1 数据选择器	135
4.7.2 数据分配器	137
练习与思考	138
本章习题	138
第5章 时序逻辑电路	141
5.1 双稳态触发器	141
5.1.1 R-S 触发器	141
5.1.2 J-K 触发器	146
5.1.3 D 触发器	147
5.1.4 T 触发器	149
5.1.5 触发器逻辑功能的转换	150
练习与思考	151
5.2 寄存器	151
5.2.1 数码寄存器	152
5.2.2 移位寄存器	153
5.2.3 集成寄存器	155
练习与思考	156
5.3 计数器	156
5.3.1 异步计数器	156
5.3.2 同步计数器	162
5.3.3 移位寄存器型计数器	166
5.3.4 集成计数器及应用	168
练习与思考	174
5.4 顺序脉冲分配器	174

5.4.1 一般计数器译码器型分配器	174
5.4.2 移位寄存器型脉冲分配器	175
练习与思考	176
本章习题	177
第6章 可编程逻辑器件	181
6.1 可编程只读存储器	181
6.1.1 浮栅编程原理	181
6.1.2 EPROM 的结构和工作原理	182
6.1.3 集成只读存储器	184
6.1.4 PROM 的应用	185
6.2 低密度可编程逻辑器件	187
6.2.1 可编程阵列逻辑简介	188
6.2.2 通用阵列逻辑简介	189
6.3 高密度可编程逻辑器件	191
6.3.1 现场可编程门阵列 FPGA 简介	192
6.3.2 复杂可编程逻辑器件 CPLD 简介	193
6.3.3 CPLD 器件 ispLSI1016	194
6.4 可编程逻辑器件的编程应用	200
6.4.1 原理图输入方式	200
6.4.2 硬件描述语言输入方式	201
6.4.3 器件的下载编程	205
本章习题	206
第7章 模拟量和数字量的转换	208
7.1 D/A 转换器	208
7.1.1 D/A 转换器的转换特性	208
7.1.2 权电阻求和网络 D/A 转换器	208
7.1.3 R-2R 梯形电阻网络 D/A 转换器	209
7.1.4 R-2R 倒梯形电阻网络 D/A 转换器	211
7.1.5 集成 D/A 转换器简介	212
7.1.6 D/A 转换器的主要技术指标	213
练习与思考	213
7.2 A/D 转换器	213
7.2.1 A/D 转换器的基本概念	214
7.2.2 A/D 转换器的工作原理	216
7.2.3 集成 A/D 转换器简介	218
7.2.4 A/D 转换器的主要技术指标	219
练习与思考	219
本章习题	219
第8章 信号的发生与变换	221
8.1 正弦波振荡电路	221
8.1.1 正弦波振荡电路的基本工作原理	221

8.1.2 RC 正弦波振荡电路	222
8.1.3 LC 正弦波振荡电路	223
8.1.4 石英晶体振荡器	226
练习与思考	228
8.2 非正弦信号发生器	228
8.2.1 矩形波信号发生器	228
8.2.2 三角波信号发生器	230
8.2.3 锯齿波信号发生器	232
8.3 信号变换电路	232
8.3.1 施密特电路	232
8.3.2 电压—频率变换电路	234
8.3.3 电压与电流之间的变换	235
8.3.4 555 集成电路的组成及应用	237
练习与思考	243
本章习题	243
第9章 电力电子技术基础	248
9.1 电力电子器件	248
9.1.1 晶闸管	248
9.1.2 派生晶闸管	251
9.1.3 电力晶体管	253
9.1.4 电力场效应晶体管	253
9.1.5 绝缘栅双极晶体管	253
练习与思考	254
9.2 整流电路	255
9.2.1 不可控整流电路	255
9.2.2 可控整流电路	259
9.2.3 滤波电路	265
练习与思考	267
9.3 直流变换电路	267
9.3.1 线性直流稳压电路	268
9.3.2 开关直流稳压电路	270
练习与思考	276
9.4 逆变电路	276
9.5 交流变换电路	278
9.5.1 交流调压电路	278
9.5.2 补偿式交流稳压电路	281
练习与思考	283
本章习题	283
第10章 电子电路的 Pspice 仿真分析	287
本章习题	300
附录	302

附录 A 半导体分立器件型号命名方法	302
附录 B 半导体集成电路型号命名方法	303
附录 C 常用模拟集成电路的参数和符号	304
附录 D 常用数字集成电路功能和外引线排列	306
附录 E 电阻器标称阻值系列	307
部分习题答案	308
参考文献	313

第1章 常用半导体元器件

半导体元器件是用半导体材料制成的电子元器件，随着电子技术的飞速发展，各种新型半导体元器件层出不穷。半导体元器件是组成各种电子电路的核心元件，学习电子技术必须首先了解半导体元器件的基本结构和工作原理，掌握它们的特性和参数。本章从讨论半导体的导电特性和PN结的单向导电性开始，分别介绍二极管、双极型晶体管、绝缘栅场效应晶体管 and 半导体光电器件等常用的半导体元器件。

1.1 半导体的导电特性

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

自然界的物质，按导电能力的强弱可分为导体、绝缘体和半导体三类。物质的导电能力可以用电导率 σ 或电阻率 ρ 来衡量，二者互为倒数。物质的导电能力越强，其电导率越大，电阻率越小。

导电能力很强的物质称为**导体**。金属一般都是导体，如银、铜、铝、铁等。原因是其原子最外层的电子受原子核的束缚作用很小，可以自由移动，成为**自由电子**。在外电场作用下，自由电子逆电场方向运动而形成电流。导体的主要特征是电阻率 ρ 很小，一般在 $0.01 \sim 1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 之间，例如铜的电阻率为 $0.0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

绝缘体是导电能力极弱的物质。这种物质的核外电子被束缚得很紧，因而不能自由移动。如橡胶、塑料、陶瓷、石英等都是绝缘体。绝缘体的电阻率大于 $10^{14} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。其电阻率在 $10 \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 之间。如硅、锗、硒、砷化镓等都属于半导体。例如，在 27°C 时，纯硅的电阻率为 $21 \times 10^8 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；纯锗的电阻率为 $47 \times 10^8 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。此外，半导体还具有不同于其他物质的一些特性：

(1) **热敏特性** 金属的电阻率随温度的变化很小，例如，温度每升高 1°C ，铜的电阻率增加 0.4% 左右，即温度升高 100°C ，电阻率增加不到一半。而半导体的导电能力对温度变化反应灵敏，电阻率随温度升高而显著降低。例如，纯锗在温度从 20°C 升高到 30°C 时，其电阻率就要降低一半左右。利用这种特性可以制成各种半导体热敏元件，用来检测温度变化。

(2) **光敏特性** 金属的电阻率不受光照的影响，但半导体的导电能力对光照敏感，光照可使半导体的电阻率显著减小。利用这种特性可以制成各种光敏元件。

(3) **掺杂特性** 金属中含有少量杂质时，电阻率没有显著变化。但若在纯净的半导体中加入微量杂质，其电阻率会发生很大变化，导电能力可增加几十万乃至几百万倍。例如，在纯硅中掺入百分之一的硼后，硅的电阻率会从 $21 \times 10^8 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 降到 $4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 左右。利用这种特性可制成半导体二极管、三极管、场效应晶体管及晶闸管等各种不同用途的

半导体器件。

为什么半导体会有一些不同于其他物质的特点呢？这要从其原子结构去分析。

1.1.2 本征半导体及其导电机理

在现代电子技术中，用得最多的半导体是锗和硅，它们的原子最外层电子都是4个，因此都是四价元素。最外层电子受原子核束缚力最小，称为价电子。物质的化学性质是由价电子数决定的，半导体的导电性质也与价电子有关。

将锗和硅材料提纯并形成单晶体后，锗和硅原子就是按四角形系统组成晶体点阵，即每个原子处于正四面体中心，而有4个其他原子位于四面体的顶点，如图1-1所示。由于原子之间靠得很近，原来分属于每个原子的价电子就要受到相邻原子的影响而使价电子为两个原子所共有，即形成了晶体中的共价键结构。图1-2是硅晶体中共价键结构平面示意图。

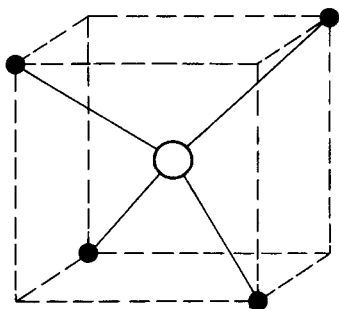


图 1-1 晶体中原子的排列方式

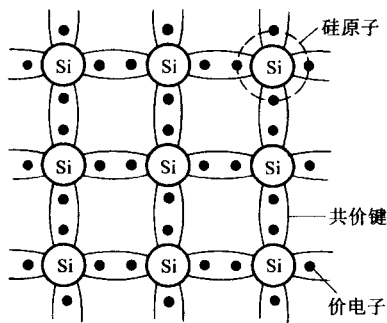


图 1-2 硅晶体中的共价键结构平面示意图

本征半导体就是完全纯净的，具有完整晶体结构的半导体。它是相对于杂质半导体而言的。例如，纯锗和纯硅。

本征半导体共价键结构中的电子受到两个原子核的吸引而被束缚。它们不像导体中的价电子那么自由，但也不像绝缘体中的电子被束缚得那么紧。在室温下，由于热激发，会使一些价电子获得足够的能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子。这种现象叫做**本征激发**。当电子跑出其共价键成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，这个空位称作**空穴**。在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现的，有一个自由电子就有一个空穴，如图1-3所示。挣脱共键价束缚的电子类似于导体中的自由电子，在电场的作用下将逆电场方向运动形成电流。失去价电子的原子成为带正电的正离子，因此可以把空穴看成是带正电的粒子，它能够吸引邻近共价键中的价电子来填补这个空穴。这时失去了价电子的邻近共价键中出现的空穴又可以吸引其邻近的价电子来递补。如此进行下去，就相当于空穴在移动。价电子填充空穴的移动相当于带正电荷的粒子（空穴）的移动，也会形成电流。

总之，在外加电场作用下，半导体中出现两部分电流：即自由电子作定向移动而形成的**电子电流**和仍被原子核束缚的价电子递补空穴而形成的**空穴电流**。因此，自由电子和空穴都称为**载流子**。两种载流子同时参与导电是半导体导电方式的最大特点，也是半导体和金属在导电原理上的本质区别所在。

自由电子填补空穴的运动叫做**复合**。在一定的温度下，本征半导体中的电子空穴对的数

目保持一定,也就是说,电子和空穴对不断产生,同时又不断复合,处于一种动态平衡状态。温度愈高,载流子数目愈多,导电能力也愈强。所以,温度是影响半导体导电性能的一个很重要的外部因素。

1.1.3 N型半导体和P型半导体

本征半导体虽有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力很弱。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素),就会使掺杂后的半导体(称作杂质半导体)的导电能力显著增强。因所掺入的杂质不同,杂质半导体可分为N型和P型两大类。

(1) **N型半导体** 若在三价的硅(或锗)晶体中掺入少量五价元素磷(P),晶体点阵中磷原子就会占据某些硅原子原来的位置,如图1-4所示。磷原子中的5个价电子只有4个能够和相邻的硅原子组成共价键结构,余下的一个电子因不受共价键的束缚,容易挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子。于是自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称其为**电子型半导体**或**N型半导体**。N型半导体中,由于自由电子数远大于空穴数,因此自由电子是**多数载流子**(简称**多子**),空穴是**少数载流子**(简称**少子**)。由于磷原子是施放电子的,故称磷为**施主杂质**。

(2) **P型半导体** 若在硅(或锗)的晶体中掺入三价元素硼(B),由于硼原子只有3个价电子,因而在组成共价键结构时,因缺少一个价电子而多出一个空穴,如图1-5所示。于是半导体中空穴数目大量增加,空穴导电成为这种半导体的主要导电方式,故称它为**空穴型半导体**或**P型半导体**。由于硼原子是接受电子的,故称为**受主杂质**。在P型半导体中,空穴为多子,自由电子为少子。

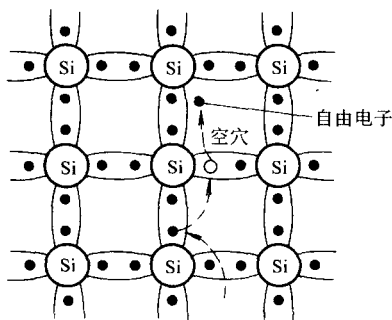


图1-3 空穴和自由电子的形成

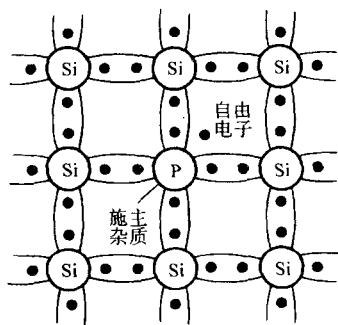


图1-4 硅晶体中掺入磷元素

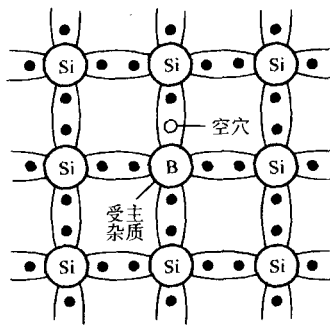


图1-5 硅晶体中掺入硼元素

不论是N型半导体还是P型半导体,尽管都有一种载流子占多数,但是整个晶体仍是电中性的。

【练习与思考】

1.1.1 电子导电和空穴导电有什么区别?空穴电流是不是由自由电子递补空穴形成的?

1.1.2 N型半导体中的自由电子多于空穴,P型半导体中的空穴多于自由电子,是否N型半导体带负电,而P型半导体带正电?

1.2 PN 结及其单向导电性

虽然 P 型和 N 型半导体的导电能力比本征半导体增强了许多,但并不能直接用来制造半导体器件。通常采用一定的掺杂工艺,在一块晶片的两边掺入不同的杂质,分别形成 P 型半导体和 N 型半导体,在它们的交界面处就会形成 **PN 结**,它是构成各种半导体器件的基础。那么 PN 结是怎样形成的,有何特性呢?

1.2.1 PN 结的形成

掺杂工艺完成后,一块半导体晶片形成 P 型和 N 型的两个异型区。P 区内空穴很多而电子很少, N 区内电子很多而空穴很少,多数载流子由于浓度的差异而产生**扩散运动**。空穴要从浓度高的 P 区向 N 区扩散,并与 N 区的电子复合;电子要从浓度高的 N 区向 P 区扩散,并与 P 区的空穴复合。扩散使得 P 区和 N 区分别因失去空穴和电子而在交界面两侧留下带负电和正电的离子,形成了一个**空间电荷区**,如图 1-6 所示。这个空间电荷区就是 PN 结。

空间电荷区的正负离子虽然带有电荷,但它们不能移动,因而不能参与导电。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并被复合掉了,或者说消耗尽了,所以空间电荷区也称为**耗尽层**,它的电阻率很高。

正负离子在空间电荷区形成一个电场,称为**内电场**。由于内电场的方向与扩散运动的方向相反,即对多数载流子的扩散起阻挡作用,所以空间电荷区又称为**阻挡层**。

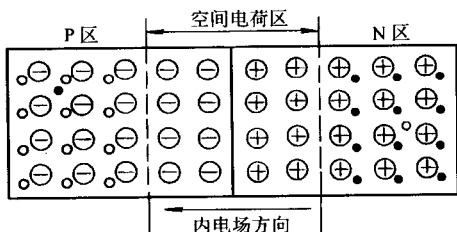


图 1-6 PN 结的形成

虽然内电场阻碍多数载流子的扩散运动,但对少数载流子越过空间电荷区进入对方区域起着推动作用。这种少数载流子在电场作用下有规则的运动称为**漂移运动**。漂移运动使交界面两侧 P 区和 N 区由于扩散运动而失去的空穴和电子得到一些补充,其作用与扩散运动相反。

由此可见,PN 结的形成过程中存在着两种运动:一种是多数载流子因浓度差而产生的扩散运动,另一种是少数载流子在内电场作用下产生的漂移运动。这两种运动相互制约,最终,从 P 区扩散到 N 区的空穴数与从 N 区漂移到 P 区的空穴数相等,从 N 区扩散到 P 区的电子数与从 P 区漂移到 N 区的电子数相等,在一定条件下达到动态平衡,使 PN 结处于相对稳定状态。

1.2.2 PN 结的单向导电性

PN 结在没有外加电压时,其中的扩散和漂移处于动态平衡,PN 结内无电流通过。那么在 PN 结两端加上外部电压后,情况会怎样?

(1) **PN 结外加正向电压** 将 PN 结 P 区接电源正极, N 区接电源负极,称为 PN 结外加正向电压,又叫**正向偏置**,如图 1-7 所示。PN 结正向偏置时,外电场与内电场方向相

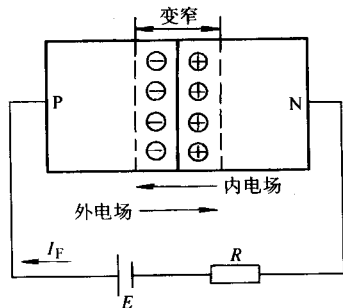


图 1-7 PN 结正向偏置

反,从而削弱了内电场,破坏了PN结原有的动态平衡,使得空间电荷区的宽度减小,多数载流子的扩散运动显著增强,形成较大的扩散电流,而少数载流子的漂移运动减弱。所以在外加正向电压的PN结中,扩散电流占主导地位,PN结呈现的电阻很低,在外电路中形成较大的流入P区的正向电流 I_F 。

(2) **PN结外加反向电压** 将PN结N区接电源正极,P区接电源负极,称为PN结外加反向电压,又叫反向偏置,如图1-8所示。PN结反向偏置时,外电场与内电场方向相同,同样也破坏了PN结原有的动态平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,使得空间电荷增加,空间电荷区变宽,内电场增强,使多数载流子的扩散运动难以进行,扩散电流趋近于零。同时,内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动,但由于少数载流子数量很少,因此反向电流 I_R 不大,PN结呈现很高的反向电阻。又因为少数载流子是由于价电子获得能量挣脱共价键的束缚而产生的,环境温度愈高,少数载流子的数量愈多。所以,温度对反向电流的影响很大。由于一定温度下,少数载流子的数目是一定的,当电压超过某数值后,全部少数载流子都参与导电,此时反向电流几乎与外加电压的大小无关,故称为反向饱和电流。

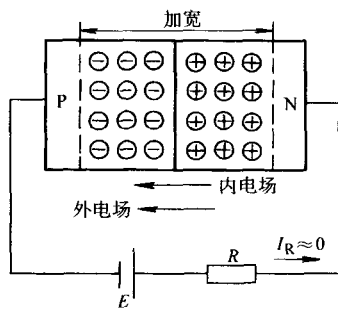


图 1-8 PN 结反向偏置

总之,外加正向电压时,PN结电阻很低,正向电流很大,PN结处于导通状态;外加反向电压时,结电阻很高,反向电流很小,PN结处于截止状态。这就是**PN结的单向导电性**。

【练习与思考】

- 1.2.1 为什么说扩散运动是多数载流子的运动,漂移运动是少数载流子的运动?
- 1.2.2 空间电荷区既然是由带电的正、负离子形成的,为什么它的电阻率很高?

1.3 半导体二极管

1.3.1 二极管的基本结构

半导体二极管是由一个PN结加上电极引出线和外壳构成的,P区一侧引出的电极称为**阳极**,N区一侧引出的电极称为**阴极**,图形符号如图1-9a所示。二极管有很多类型。按材料的不同,常用的二极管可分为硅管和锗管两种;按PN结结构形式的不同,又可分为点接触型、面接触型和平面型等。

(1) **点接触型二极管** 结构如图1-9b所示,由三价金属铝的触丝与锗结合构成PN结。其特点是PN结的结面积很小,因而结电容小,适用于高频(可达几百兆赫)电路。但不能通过较大的电流,也不能承受高的反向电压。主要用于高频检波和开关电路。

(2) **面接触型二极管** 结构如图1-9c所示,PN结是用扩散法或合金法做成的。其特点是PN结的结面积大,能通过较大的电流(可达几千安),但结电容也大,适用于频率较低的整流电路。

(3) **平面型二极管** 结构如图1-9d所示。它是采用先进的集成电路制造工艺制成的。其特点是结面积较大时,能通过较大的电流,适用于大功率整流电路;结面积较小时,结电